Capitolo 4

Efficienza energetica e comfort degli edifici in legno

4.1 • ISOLAMENTO TERMICO E RISPARMIO ENERGETICO

L'Italia da decenni è la nazione, in Europa, meno attenta alla questione dell'isolamento termico.
Nella Figura 4.1 si riportano gli spessori medi di isolanti in copertura utilizzati nei vari paesi dell'Unione Europea: si mette in evidenzia la posizione arretrata del nostro paese.

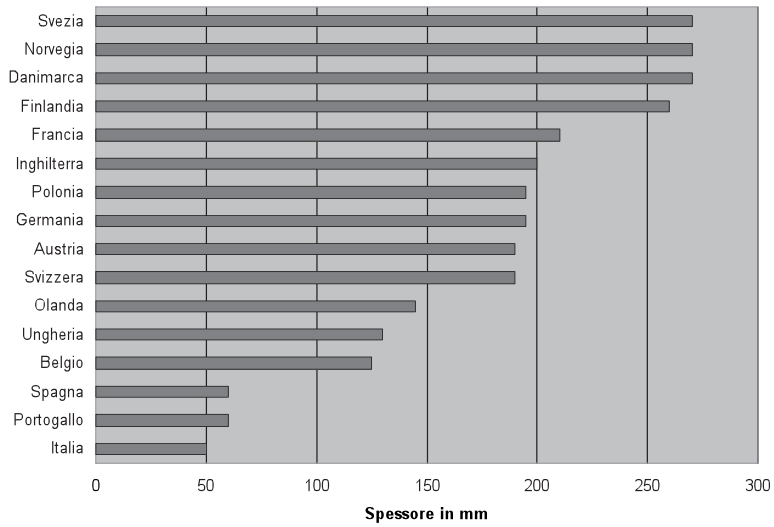


Figura 4.1_Grafico indicante gli spessori medi di isolante in copertura - paesi EU (Fonte Eurima).

Le motivazioni di ciò si devono ricercare nella disattenzione del legislatore nei confronti della buona qualità dell'abitare, ma anche in una certa inerzia da parte di chi (università, tecnici e costruttori) avrebbe dovuto avere maggiore interesse per la crescita e l'innovazione del settore delle costruzioni. È mancata invece la volontà di uscire dallo stretto perimetro disegnato da norme oggettivamente inadeguate, al fine di cercare soluzioni progettuali ed applicative che accrescano la qualità ed il comfort delle abitazioni.

Gli strumenti legislativi che hanno "regolato" il settore in questi anni hanno poi preso in considerazione un solo aspetto del complesso mondo dell'isolamento termico: l'isolamento invernale.
L'approccio così riduttivo a questa tematica ha certamente reso più remoto il raggiungimento degli obiettivi fissati per le emissioni clima-alteranti ed in generale non ha giovato al contenimento dei consumi energetici.
Allo stato attuale in Italia negli edifici (residenziali e terziario), si utilizza circa il 30% dell'energia finale consumata, il 31% dell'energia elettrica e il 44% dell'energia termica (combustibili).
A questi consumi energetici è riconducibile circa il 28% delle emissioni nazionali di CO_2.

Il 78% dell'energia finale consumata annualmente negli edifici è impiegato per il riscaldamento, il 15% per produrre acqua calda, il 5% per cucinare e per gli elettrodomestici e il 2% per l'illuminazione.
Gli impianti di condizionamento/raffrescamento aumentano mediamente i consumi energetici finali annui di un edificio del 25% (Figura 4.2) e le statistiche ci vedono, dopo la Spagna, i maggiori acquirenti di condizionatori.

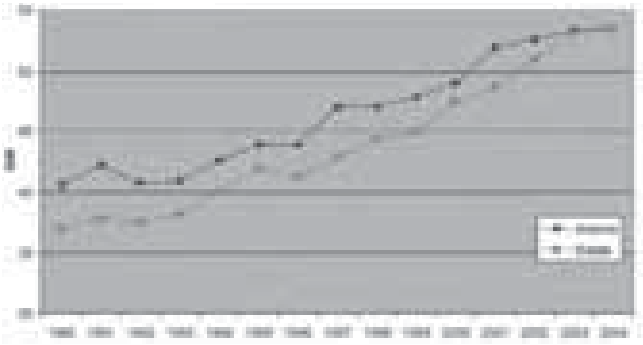


Figura 4.2_Domanda elettrica di picco invernale ed estiva: dati storici e previsioni (Fonte MAP).

Queste considerazioni ci pongono di fronte all'obbligo di una attenta ed ampia progettazione dell'isolamento termico.
Per una corretta valutazione di un isolamento termico sarebbe necessario tener conto dei seguenti fattori:
- Isolamento termico invernale
- Isolamento termico estivo
- Valutazione del rischio di condensa superficiale
- Permeabilità al vapore e valutazione del rischio di condensa interstiziale
- Impermeabilità all'aria

Oltre a questi che sono fattori "tecnici - prestazionali", finalizzati al contenimento del dispendio energetico, è necessario tenere di buon conto quanto la scelta del materiale concorre alla definizione di ambienti confortevoli e salubri. Gli europei passano il 90% della loro vita all'interno di un edificio, che sia abitazione o scuola o luogo di lavoro. Ciò fa si che sia necessaria una attenta analisi di quanto questi materiali incidono sulla qualità ambientale.
Questo significa studiare approfonditamente quali rischi per l'ambiente e per l'uomo comporta la scelta di un materiale sia nelle fasi di produzione e smaltimento, ma anche qual è il comportamento del materiale durante il normale esercizio, quali sono le interazioni di questo materiale con i materiali da costruzione con cui viene a contatto, come si comporta interagendo con le sostanze normalmente presenti in un edificio e come reagisce in caso di eventi straordinari (incendio, allagamenti ecc).

La progettazione dell'isolamento termico nelle costruzioni in legno non ha metodologie o tecniche differenti da quelle utilizzate nelle strutture in muratura o miste (muratura e c.a.).

Il legno è un materiale ad alte prestazioni e con una durabilità che non ha pari tra i materiali da costruzione; condizione fondamentale, per conservare inalterate nel tempo queste peculiarità, è il rispetto di alcune semplici regole. Una di queste regole, strettamente legata alla valutazione della quantità, qualità e posizionamento della coibentazione termica, riguarda la gestione dell'umidità all'interno della struttura e gli eventuali fenomeni di condensa interstiziale.
Contrariamente a quanto si è portati a credere, il legno può inumidirsi ma è importante che abbia la possibilità di asciugarsi velocemente: non è l'acqua in se ad essere dannosa, ma mantenere il legno in una situazione di umidità eccessiva avvia vari processi degenerativi talvolta irreversibili.
Anche nella progettazione di strutture in muratura non si può prescindere da una corretta valutazione termo-igrometrica. In caso di umidità eccessiva, anche queste tipologie costruttive, soffrono di problemi di integrità con l'avvio di processi di ammaloramento estremamente accelerati. Va sottolineato che la presenza di umidità eccessiva in un edificio, qualunque sia la tecnica costruttiva utilizzata, prima ancora di danneggiare gli elementi costruttivi, determina un sensibile decadimento delle prestazioni termiche della costruzione e un ambiente malsano per i suoi abitanti.

L'introduzione delle costruzioni in legno sul mercato italiano può essere vista come un'opportunità per la disseminazione di cultura tecnica sia in fase progettuale che realizzativa, che sta alla base del buon costruire, qualunque sia il materiale scelto.

4.1.1 Isolamento invernale

L'isolamento invernale, dal punto di vista del calcolo, è verosimilmente la valutazione più semplice da fare poiché si opera in un regime sostanzialmente stazionario.
Il parametro utilizzato per valutare l'attitudine di un materiale ad isolare termicamente è la **Conduttività Termica** normalmente indicata con la lettera λ (lambda); si definisce come "il rapporto, in condizioni stazionarie, fra il flusso di calore (misurato in W) che attraversa una superficie e il gradiente di temperatura che provoca il passaggio del calore stesso.

Materiale	Conduttività termica [W/mk]
Aria (a condizioni ambiente)	0,026
Acqua distillata	0,60
Vetro	1
Ferro	73
Rame	386
Argento	407
Diamante	1000

Tabella 4.1_Conduttività termica di alcuni materiali

Un materiale viene considerato isolante quando ha un λ inferiore a 0,065 W/mK.

Materiale	Conduttività termica [W/mk]
Fibra di vetro	0,037
Lana di roccia	0,036
XPS	0,036
EPS	0,034
Poliuretano espanso	0,028
Sughero espanso	0,040
Vetro cellulare	0,041
Fibra di legno	0,040

Tabella 4.2_Conduttività termica di alcuni materiali isolanti

La misurazione del λ di un materiale avviene in condizioni di temperatura e di umidità definite dalla normativa di riferimento. La norma UNI EN ISO 10456 fornisce i parametri ed i metodi per l'adeguamento delle prestazioni del materiale, quando le condizioni di progetto siano differenti da quelle in cui è stato eseguito il test.

La conducibilità termica è indipendente dallo spessore e dalla forma del materiale, mentre è intuitivo che all'aumentare della quantità del materiale isolante diminuirà la quantità di calore disperso.
La capacità isolante di un materiale in funzione dello spessore del materiale stesso, è definita dalla **Resistenza Termica**.

La formula della Resistenza Termica è:

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad [m^2\,K/W]$$

dove:

d è lo spessore dello strato
λ è Conduttività Termica del materiale

Le strutture sono solitamente composte da più strati di materiali diversi, caratterizzati da diverse Conduttività Termiche, diversi spessori e quindi diverse resistenze termiche.
La resistenza termica complessiva di una struttura composita si calcola come la

sommatoria delle singole resistenze:

$$R_{tot} = \Sigma\, R_{\lim est}\,, R_{strati}\,, R_{\lim int}$$

In questo calcolo viene inserita anche la resistenza termica offerta dallo strato di aria che lambisce le superfici interna ed esterna. Questa resistenza si dice **Resistenza Liminare** (interna o esterna). I valori di queste resistenze sono normati nella UNI EN ISO 6946 a seconda della direzione del flusso di calore e della velocità dell'aria in prossimità della superficie: quindi si avranno resistenze diverse a seconda che si esamini una copertura, una parete o una parete ventilata.

Per descrivere la quantità di calore che attraversa un elemento costruttivo, esiste un parametro detto **Trasmittanza Termica** (simbolo **U**). Si misura in W/m² K, ovvero quanti Watt attraversano un elemento di un m² quando tra due facce vi sia una differenza di 1 grado Kelvin.
Per calcolare la trasmittanza termica si usa la seguente formula:

$$U = \frac{1}{R_{tot}} \quad [W/m^2\,K]$$

Il miglior isolante esistente in natura è l'aria ferma ed asciutta; per questo motivo gli isolanti contengono sempre grandi quantità di aria intrappolata all'interno della loro struttura (tra le fibre, nelle cellette, tra le sfere ecc). Per contro, un pessimo isolante, abbondantemente presente intorno a noi, è l'acqua.
Quindi si deve prestare molta attenzione che l'aria ferma ed asciutta, presente negli isolanti, non sia sostituita, per condensa o altro motivo, da acqua.
Vista la necessità di contenere una grande quantità di aria, normalmente, un buon isolante non è un materiale con buone caratteristiche di resistenza meccanica, cosi come i materiali comunemente usati per le strutture hanno dei coefficienti di conduttività termica molto alti (il cemento armato ha un λ di 2,30 W/mK).
A questa regola fa eccezione il legno che, pur essendo un ottimo materiale strutturale, ha un λ 0,13 W/mK.
Per capire come si comporta il legno rispetto alla conduzione del calore, basta confrontarlo con alcuni dei principali materiali da costruzione:

Materiale	Conduttività termica [W/mk]	Massa volumica [kg/m³]
Mattone pieno	0,70	1400
Mattone doppio UNI	0,40	913
Blocco porizzato 30x25x25	0,19	770
Muratura in pietra	2,30	2600
Cemento armato	2,30	2300
Calcestruzzo CLS	1,65	2200
Legno di conifere	0,13	500

Tabella 4.3_Conduttività Termica dei materiali da costruzione

Per visualizzare in maniera semplice i dati contenuti nella tabella 1, immaginiamo di costruire una parete verticale opaca con ognuno dei materiali elencati, ponendoci come obiettivo il raggiungimento di una trasmittanza (**U**) di 0,20 W/m²K variando lo spessore del materiale.
Il procedimento di calcolo è il seguente:

$$U = \frac{1}{R_{tot}}$$

$$R_{tot} = \Sigma\, R_{\lim est}, R_{strati}, R_{\lim int}$$

$$R_{strato} = \frac{d}{\lambda}$$

dove:

U è laTrasmittanza parete
R_{tot} è la sommatoria delle resistenze termiche dei vari strati (R_{strati})
$R_{lim\ est} - R_{lim\ int}$ è la resistenze liminari interne ed esterne
d è lo spessore dello strato
λ è la Conduttività Termica del materiale costituente lo strato

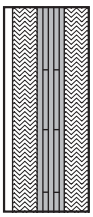
Materiale	Conduttività termica [W/mk]	Spessore [m]
Mattone pieno	0,7	3,35
Mattone doppio UNI	0,27	1,90
Blocco porizzato 30x25x25	0,18	0,90
Muratura in pietra	2,3	11,00
Cemento armato	2,3	11,00
Calcestruzzo CLS	1,65	7,90
Legno di conifere	0,13	0,62

Tabella 4.4_Spessori necessari per U = 0,20

Dalle tabelle precedenti si ricava che il legno è, tra i materiali strutturali, quello che ha la migliore Conduttività Termica (λ). Questa peculiarità del legno si evidenzia particolarmente nelle strutture a pannelli portanti.

Ipotizzando una parete composta così composta:

- Doppio pannello di fibrogesso
- Materassino di canapa
- Pannello di X Lam 100 mm
- Pannello coibente fibra di legno
- Rasatura traspirante esterna



	Materiale	Spessore [mm]	Massa [kg/m^3]	λ [W/mK]
Interno				
1	Fibrogesso	10 + 10	1.620	0,320
2	Canapa	60	38	0,038
3	X - Lam	100	550	0,130
4	Fibra di legno	100	190	0,040
5	Intonaco	7	1.150	0,680
Esterno				

Tabella 4.5_Esempio di stratigrafia parete X-Lam

Calcolando la Resistenza termica di ciascuno strato, secondo la formula

$$R = \frac{d}{\lambda}$$

dove:

d è lo spessore (in metri)
λ è la Conduttività Termica

otteniamo:

	Materiale	Spessore [mm]	λ [W/mK]	R [m^{2}K/W]
Interno				0,130
1	Fibrogesso	10 + 10	0,320	0,062
2	Canapa	60	0,038	1,579
3	X - Lam	100	0,130	0,769
4	Fibra di legno	100	0,040	2,500
5	Intonaco	7	0,680	0,010
Esterno				0,040
			$\sum R$	**5,091**

Tabella 4.6_Esempio di stratigrafia parete X-Lam. Prestazioni

Resistenza Totale = 5,091 m^2K/W
Da cui, secondo la formula U = 1/Rt
U = 0,20 W/m^2K

Se si volesse raggiungere lo stesso risultato di trasmittanza termica sostituendo l'elemento strutturale in legno con mattone pieno, si otterrebbe questa stratigrafia di parete:

	Materiale	Spessore [mm]	λ [W/mK]	R [m^2K/W]
Interno				0,130
1	Fibrogesso	10 + 10	0,320	0,029
2	Canapa	60	0,038	1,579
3	Mattone pieno	721	0,700	1,030
4	Fibra di legno	100	0,040	2,500
5	Intonaco	7	0,680	0,010
Esterno				0,040
			$\sum R$	**5,091**

Tabella 4.7_Esempio di stratigrafia parete tradizionale. Prestazioni

Quindi la parete passerebbe da 29 cm di spessore e 114 kg di peso, ad uno spessore di 91 cm e 496 kg di peso!

Un altro aspetto fondamentale è l'omogeneità della struttura. Nel caso, ad esempio, si stia valutando una struttura a pannelli strutturali (X-Lam) si può contare addirittura su elementi strutturali che assolvono anche il compito di tamponamento esterno.

Per apprezzare il valore di questo aspetto, si deve confrontare una parete intelaiata con materiali tradizionali (c.a. e laterizio porizzato) ed una parete di un edificio realizzato in pannelli portanti:

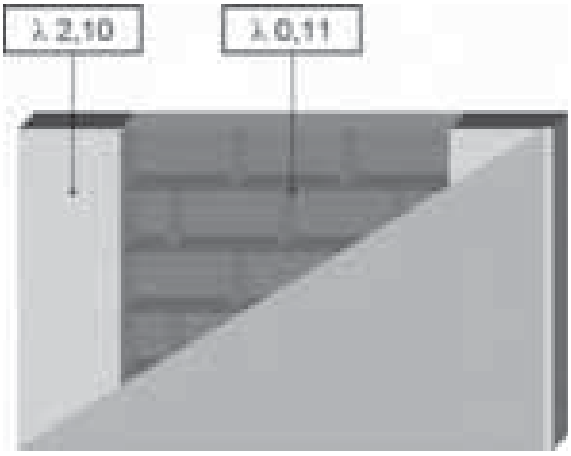


Figura 4.3_Differenze di Conduttività Termica in una struttura tradizionale

Applicando 15 mm di intonaco sulle due facce della parete si otterrà:
- nella zona del tamponamento in laterizio porizzato.

Materiale	Spessore [mm]	λ [W/mK]	R [m²K/W]
Interno			0,13
Intonaco	15	0,80	0,02
Blocco porizzato	300	0,25	1,20
Intonaco	15	0,80	0,02
Esterno			0,04
		Resistenza totale	1,40

Tabella 4.8_Calcolo resistenza termica tamponamento.

Pari ad una trasmittanza U = 0,71 W/m²K

• nella zona della struttura in cemento armato si otterrà

Materiale	Spessore [mm]	λ [W/mK]	R [m²K/W]
Resistenza interna			0,13
Intonaco	15	0,80	0,02
Pilastro CA	300	2,30	0,13
Intonaco	15	0,80	0,02
Resistenza esterna			0,04
		Resistenza totale	0,33

Tabella 4.9_Calcolo resistenza termica telaio cemento armato

Pari ad una trasmittanza U = 3,03 W/m²K

La differenza di trasmittanza che c'è tra il cemento armato ed il laterizio porizzato utilizzato per le tamponature è notevole e con differenze così marcate (324% !!!) risulta sempre abbastanza difficile trovare una soluzione per l'isolamento termico, che sia:
• compatibile con le esigenze strutturali
• compatibile con le esigenze architettoniche
• facilmente gestibile in cantiere
La soluzione adottata nella maggior parte dei casi è quella di fare una media tra le due trasmittanze rischiando però la formazione di condensa in corrispondenza dei ponti termici.

In conclusione, per la valutazione dell'isolamento invernale le due grandezze da prendere in considerazione sono la Conduttività Termica (λ) e lo spessore del materiale, la posizione dell'isolante rispetto alla struttura, ai fini del calcolo, non ha alcuna influenza.
Questa "regola" ha valore solo teorico e solo se si prende in considerazione l'isolamento invernale senza curarsi di tutti gli altri aspetti che influenzano il comfort abitativo.
Come si vedrà in seguito nella scelta e nel posizionamento dei sistemi isolanti saranno molti i fattori da analizzare.

4.1.2 Isolamento estivo

Si è accennato in precedenza come l'isolamento estivo abbia un peso rilevante nell'ottenimento di un corretto contenimento del dispendio energetico.
Oltre a ciò si deve considerare che l'eccessivo surriscaldamento estivo delle abitazioni è uno dei principali motivi di discomfort abitativo che si registra negli alloggi realizzati negli ultimi cinquant'anni.
Per ottenere risultati qualitativamente accettabili è necessario lavorare su quattro diversi aspetti:

- l'esposizione del fabbricato
- la schermatura delle aperture
- una corretta ventilazione
- una attenta valutazione dell'isolamento termico delle pareti opache.

Limitarsi a prendere in considerazione solo una parte di questi aspetti porta ad un sicuro insuccesso per quel che riguarda il contenimento del consumo energetico per il raffrescamento estivo.
Da ciò risulta evidente che è necessaria una stretta compenetrazione tra le fasi di progettazione architettonica, strutturale ed energetica.

I parametri, introdotti dalla nuova legislazione (Dlgs 192/2005 e successive modifiche e norme attuative), utili alla valutazione delle performance termiche estive di una struttura sono:

- La massa superficiale
- Trasmittanza termica periodica
- Sfasamento ed attenuazione

Per il primo di questi tre parametri la norma prescrive che, per le sole pareti verticali, nel caso del raggiungimento dei 230 kg di massa superficiale, il requisito prestazionale di isolamento termico estivo sia da ritenersi soddisfatto.
Lasciando da parte le considerazioni circa l'utilità di un indicatore così poco raffinato, trattando in questo manuale di strutture che difficilmente superano i 90 - 100 kg al m^2, diviene necessario focalizzarsi sulla verifica degli altri parametri.

Trasmittanza termica periodica (U_{dyn} o Y_{ie}): la definizione e la metodologia di calcolo per Y_{ie} - trasmittanza termica periodica - si trovano nella norma UNI EN ISO 13786:2008; questo parametro definisce la relazione tra la variazione del flusso termico sulla superficie esterna di una parete e la variazione della temperatura sulla superficie interna.
Y_{ie} è espresso in W/m^2K.

Sfasamento (φ): è definito come "*periodo di tempo tra l'ampiezza massima di una causa e massima ampiezza dei suoi effetti*", dove la causa è il riscaldamento della superficie esterna di una parete opaca e l'effetto è la conseguente variazione di temperatura della superficie interna della parete stessa.
Con lo sfasamento si misura - in ore – il tempo che intercorre tra l'istante in cui si registra la massima temperatura sul lato esterno e l'istante in cui si registra la massima temperatura sul lato interno.

Attenuazione (f_a): definito dalla norma come " *rapporto tra la trasmittanza termica periodica (Y_{ie}) e la trasmittanza termica in condizioni stazionarie* (U), descrive la riduzione di ampiezza dell'onda termica nel passaggio dalla superficie esterna alla superficie interna attraverso la struttura in esame.

Per questi parametri la norma prescrive delle prestazioni limite:
- relativamente a tutte le **pareti verticali opache**, con l'eccezione di quelle comprese nel quadrante nord-ovest / nord /nord-est, il valore del modulo della trasmittanza termica periodica (Y_{ie}) **sia inferiore a 0,12 W/m²K**
- relativamente a tutte le **pareti opache orizzontali ed inclinate** il valore del modulo della trasmittanza termica periodica (Yie) **sia inferiore a 0,20 W/m²K**

Già ad una prima lettura ci si accorge di una notevole incongruenza, quasi una "svista" del legislatore: viene richiesta alla parete una prestazione, di isolamento termico estivo, superiore rispetto a quanto richiesto alla copertura. Questa differenza è incomprensibile visto che la copertura di un edificio è la parte dell'involucro maggiormente sollecitata dall'insolazione!
In base a questa considerazione è buona norma tendere a progettare strutture verticali e di copertura che raggiungano, al minimo, un Y_{ie} = 0,12 W/m² K.

Gli altri limiti proposti dalla normativa, la cui ottemperanza non è obbligatoria, riguardano lo sfasamento e l'attenuazione. Questi limiti si possono trovare nell'allegato A del DM 26 giugno 2009 "Linee Guida Nazionali per la certificazione energetica degli edifici"

Sfasamento (ore)	Attenuazione	Prestazioni	Qualità prestazionale
S > 12	fa<0,15	ottime	I
12 >S > 10	0,15<fa<0,30	buone	II
10 >S > 8	0,30<fa<0,40	medie	III
8 >S > 6	0,40<fa<0,60	sufficienti	IV
S < 6	fa > 0,60	mediocri	V

Tabella 4.10_Linee Guida Nazionali: Sfasamento e Attenuazione

Nei casi in cui le coppie di parametri caratterizzanti l'edificio non rientrino coerentemente negli intervalli fissati in tabella, la norma prescrive che, ai fini della classificazione, prevalga il valore dello sfasamento. Questo perché se è molto importante che la struttura attenui l'onda termica entrante, lo è ancora più che l'innalzamento della temperatura sulla superficie interna della parete si manifesti, quanto più è possibile, in prossimità delle ore di bassa insolazione, quando si può sfruttare, per il raffrescamento, la ventilazione naturale.

Anche nel caso dei limiti riportati nella tabella precedente si potrebbe fare un appunto al legislatore: si è espresso un giudizio eccessivamente bonario classificando strutture con 6 ore di sfasamento come mediocri
In piena estate un edificio con una corretta esposizione a sud, dopo sei ore si trova ancora nel pieno dell'insolazione e quindi non può contare sul contributo del raffrescamento naturale.
Sei ore di sfasamento sono **assolutamente insufficienti** a garantire un buon comfort abitativo e un sicuro contenimento dei consumi energetici per il raffrescamento.

In senso opposto a quanto contenuto nelle Linee Guida, il Protocollo sulla valutazione della sostenibilità ambientale redatto da ITACA (Istituto per la Trasparenza l'Aggiornamento e la Certificazione degli Appalti), attribuisce un punteggio penalizzante (-1) a sfasamenti inferiori alle 8 ore.

Coefficiente di Sfasamento	Fattore di Attenuazione	Punteggio
< 8	> 0,35	-1
8	0,35	0
9	0,25	1
10	0,20	2
11	0,15	3
12	0,17	4
> 12	< 0,15	5

Tabella 4.11_Protocollo ITACA: scala prestazionale isolamento estivo

Dalla tabella precedente si evince che, secondo questo documento, sono ritenuti "meritevoli" sfasamenti uguali o superiori alle 9 ore.

Per ottenere buoni risultati come sfasamento termico, attenuazione e trasmittanza diventa necessario lavorare con isolanti con un alto calore specifico, una buona massa ed una bassa Conduttività Termica.
Questi tre parametri sono alla base delle valutazioni contenute nella già citata norma UNI EN 13786. Dalla combinazione di queste caratteristiche otteniamo gli indicatori fondamentali per la valutazione del comportamento del materiale in regime estivo:

Profondità di penetrazione periodica (δ): profondità alla quale l'ampiezza delle variazioni di temperatura è ridotta di un fattore e=2,718…

$$\delta = \sqrt{\frac{\lambda \cdot T}{\pi \cdot \rho \cdot c}}$$

dove:
δ è la penetrazione termica periodica - si esprime in metri)
λ è la Conduttività Termica - si esprime w/m k

ρ è la massa volumica - si esprime in kg/m^3
c è il calore specifico - si esprime in J/Kg K
T è il periodo - si esprime in secondi (86.400 secondi = 24 ore)

Diffusività termica: misura l'attitudine di un materiale a trasmettere una variazione di temperatura; minore sarà la diffusività migliore sarà la prestazione di isolamento estivo.

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}$$

dove:
α è la diffusività termica – si esprime in m^2/s
λ è la Conduttività Termica - si esprime w/m k
ρ è la massa volumica – si esprime in kg/m^3
c è il calore specifico – si esprime in J/Kg K

Nella seguente tabella sono messe a confronto le diffusività termiche di alcuni materiali da costruzione e di alcuni isolanti.

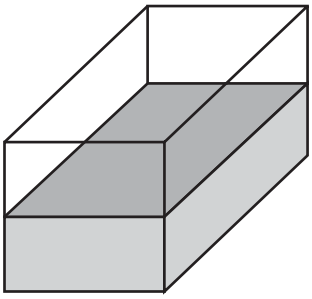
Materiale	Conduttività Termica	Calore Specifico	Massa volumica	Diffusività termica	Penetrazione termica
	[w/mk]	[j/kg·k]	[kg/m^3]	[m^2/s 10^{-6}]	[m]
Mattone pieno	0,70	1000	1400	0,500	0,117
Mattone doppio UNI	0,40	1000	913	0,438	0,110
Blocco porizzato 30x25x19	0,19	1000	770	0,247	0,082
Muratura in pietra	2,30	1000	2600	0,885	0,156
Cemento armato	2,30	1000	2300	1,000	0,166
Calcestruzzo CLS	1,65	1000	2200	0,750	0,144
Legno di conifere	0,13	2100	500	0,124	0,058
Fibra di vetro	0,04	840	100	0,440	0,110
Lana di roccia	0,04	1030	110	0,318	0,094
XPS	0,04	1450	35	0,709	0,140
EPS	0,03	1450	35	0,670	0,136
Poliuretano espanso	0,03	1400	40	0,500	0,117
Sughero espanso	0,04	1670	140	0,171	0,069
Vetro cellulare	0,04	840	115	0,424	0,108
Fibra di legno	0,04	2000	140	0,143	0,063

Tabella 4.11_Protocollo ITACA: scala prestazionale isolamento estivo

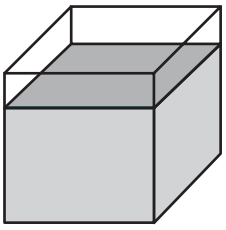
Come per l'isolamento "invernale" anche nell'isolamento "estivo" la struttura in legno contribuisce in maniera sostanziale alle buone performance dell'edificio.
Un dato che si evidenzia nella tabella precedente sono le basse penetrazioni e diffusività termica dei materiali isolanti naturali, tale da non trovare confronto con quelli sintetici.

4.2 • PERMEABILITÀ E TENUTA ALL'ARIA NELLE STRUTTURE IN LEGNO

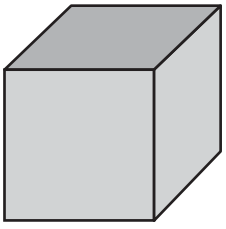
Nell'atmosfera è disciolta acqua sotto forma di vapore acqueo. La quantità di acqua presente nell'aria dipende dal calore e dalla pressione dell'aria stessa (Umidità Relativa).



Immaginiamo l'aria come un contenitore e la temperatura il volume del contenitore.
In questo contenitore è presente dell'acqua, l'umidità normalmente disciolta nell'aria, che occupa parte del volume totale
1 kg di aria a 25 C° (tbs) che contiene 9,90 gr di acqua ha una Umidità Relativa 50%.



Al diminuire del volume del contenitore (temperatura) il livello dell'acqua sale (aumenta l'umidità relativa) cioè il volume del contenuto aumenta relativamente alla capienza del contenitore.
1 kg di aria a 19,5 C° (tbs) che contiene 9,90 gr di acqua ha una Umidità Relativa 70%.



Se il contenitore riduce ulteriormente il suo volume, ovvero se la temperatura dell'aria scende, si arriverà ad un punto in cui la quantità di acqua contenuta nel contenitore eccederà alla capacità del contenitore stesso e tracimerà.
1 kg di aria a 13,9 C° (tbs) che contiene 9,90 gr di acqua ha una Umidità Relativa 100%.

Nel caso dell'atmosfera si supererà la temperatura di rugiada, cioè la temperatura di massima saturazione, per cui la quantità di acqua eccedente alla capacità di soluzione nell'aria si trasformerà, condensando, in acqua liquida.

4.2.1 La condensa superficiale

Quando l'aria lambisce una superficie fredda, la temperatura dell'aria stessa subisce un abbassamento. Quando questo abbassamento è tale da superare la temperatura di rugiada, allora si avrà la formazione di condensa sulla superficie fredda.
Il fenomeno è descritto nell'esempio seguente.
Il campione è costituito da una stanza tamponata con blocchi in laterizio porizzato la cui struttura è caratterizzata da un'importante ponte termico individuabile con la trave di solaio.

La temperatura all'interno della stanza, al di fuori dell'influenza del ponte termico, è di 20 C° con un'umidità relativa del 65%. Interpolando questi dati sul diagramma psicrometrico rileviamo l'umidità assoluta che è pari a 9,5 g di acqua (sotto forma di vapore) per kg di aria.

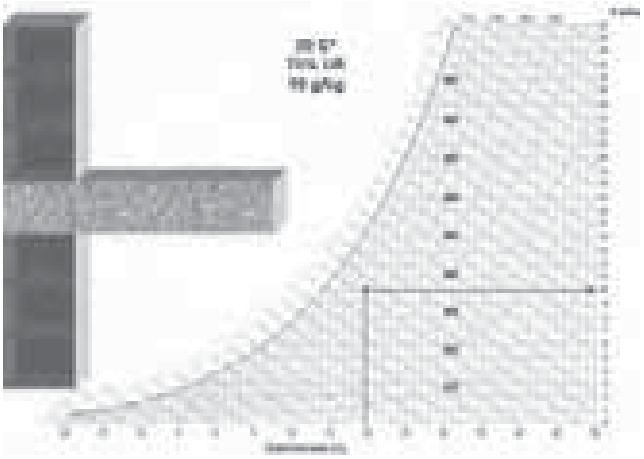


Figura 4.4_Rischio di condensa superficiale in prossimità di ponte termico.

Avvicinandosi alla muratura perimetrale, dove si incomincia a avvertire l'influenza del ponte termico, come elemento dispersivo di calore, si registrerà un calo della temperatura di 3 C°, ma la quantità di assoluta di vapore rimane invariata. Variando però la temperatura varierà l'umidità relativa, passando dal 65% al 80%.

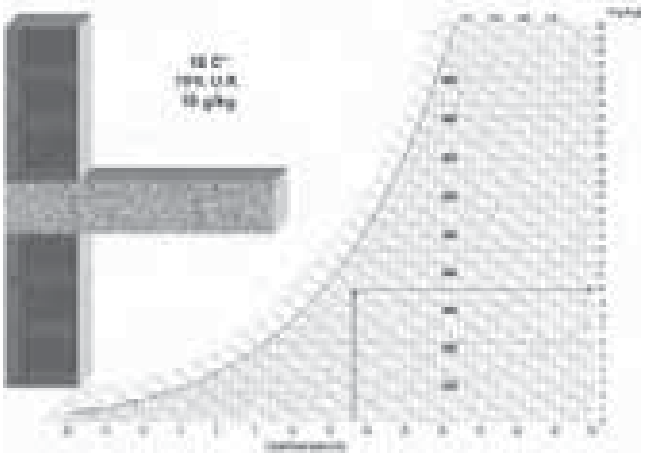


Figura 4.5_Rischio di condensa superficiale in prossimità di ponte termico

Il tasso d'umidità assoluta di 10 g/kg di aria, alla temperatura dell'aria che lambisce la parete in prossimità del ponte termico, 17 C°, fa si che l'umidità relativa sia pari al 100% e quindi si avvii il fenomeno della condensazione.

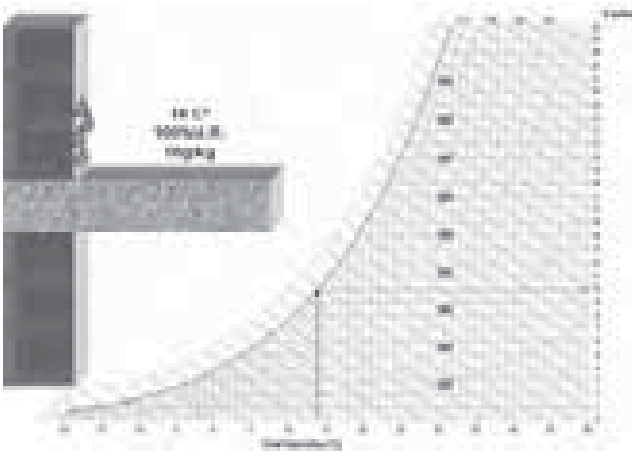


Figura 4.6_Rischio di condensa superficiale in prossimità di ponte termico

L'acqua, sotto forma di rugiada, si deposita sulle superfici, asciugandosi solo quando il tasso di umidità presente nella stanza scende.
Questo fenomeno può avvenire in qualsiasi momento in una qualsiasi porzione della struttura.

È condizione necessaria, perché il fenomeno si verifichi, che ci sia una combinazione di bassa temperatura e umidità relativa alta.
È esperienza quotidiana l'osservare la condensa superficiale sul vetro del bagno dopo la doccia o sul vetro della macchina in una mattinata fredda ed umida d'inverno. Se su una superficie non assorbente come il vetro la condensa si evidenzia in maniera marcata, sulle murature fredde, che confinano ambienti umidi, avviene con la stessa frequenza soltanto che in questo caso il fenomeno non è evidente sino a quando questa umidità, persistendo, non avvia fenomeni di deterioramento dei materiali e di germinazione di alghe e muffe sulla porzione superficiale (normalmente le pitture murali) della muratura.
La proliferazione di questi organismi talvolta può assumere proporzioni notevoli, interessando intere pareti o intere porzioni di abitazione.
I moderni edifici in legno difficilmente presentano inconvenienti simili: la struttura termicamente omogenea e l'uso del cappotto esterno garantiscono una temperatura superficiale normalmente maggiore della temperatura di rugiada, in situazioni di tassi di umidità normali.

4.2.2 La condensa interstiziale

La condensa interstiziale è il fenomeno di condensa del vapore acqueo che, attraversando una struttura per diffusione, incontra una zona, all'interno della struttura stessa, con una temperatura uguale o inferiore alla temperatura di rugiada caratteristica di quella determinata quantità di vapore.
Per calcolare il rischio di formazione di condense all'interno di una struttura composta da materiali diversi, è necessario interpolare, strato per strato, la temperatura dell'elemento e la quantità di vapore teoricamente presente.
Per poter fare questa valutazione si divide l'elemento edilizio in una serie di strati omogenei con facce piane parallele, e si definiscono le proprietà del materiale per ciascuno strato.
I parametri che interessano in questa valutazione sono:

1. λ = Conduttività Termica del materiale
2. μ= Fattore di resistenza igroscopica
3. d = Spessore del materiale

con questi dati si potrà calcolare:

- Resistenza termica dello strato preso in esame

$$R_{strato} = \frac{d}{\lambda}$$

- Spessore equivalente di aria per la diffusione del vapore

$$S_d = \mu \cdot d$$

Ogni singolo strato deve essere trattato individualmente, considerando per ciascuno separatamente le proprietà di trasmissione del calore e del vapore calcolandone la resistenza termica, ***R***, e lo spessore equivalente di aria per la diffusione del vapore, S_d.
Interpolando questi due dati, la resistenza termica - e quindi la temperatura dello strato - e la permeabilità al vapore – e quindi la pressione del vapor d'acqua in corrispondenza dello strato – è possibile calcolare se in una data posizione può verificarsi la condensazione di vapore e la quantità di acqua che si accumulerà all'interno dello strato in esame.
Sia le verifiche che le quantità di condensa accumulata ammesse sono normate con la UNI EN ISO 13788.

Questa norma, pubblicata nel 2001, codifica un nuovo atteggiamento tecnico nella gestione della diffusione del vapore e del conseguente rischio di condense interstiziali.
La novità sta nell'accettare che il vapore possa migrare all'interno di una struttura e che una quantità minima di questo vapore, fissata dalla norma in un massimo di 500 gr/m^2, possa condensare all'interno della struttura stessa. Tutta la condensa formatasi all'interno di un elemento al termine del periodo di riscaldamento, dovrà sempre evaporare prima dell'inizio della successiva stagione di riscaldamento.
La norma non dà indicazioni circa soluzioni tecniche da adottare in caso la struttura non rispondesse ai requisiti richiesti, ma dà due indirizzi lungo i quali muoversi per

risolvere la non conformità:

- Agire sulla resistenza termica dell'elemento, quindi sulle dimensioni e prestazioni dell'isolante, e sul suo posizionamento.
- Modificare le caratteristiche di resistenza alla diffusione del vapore dell'elemento.

Circa quest'ultimo aspetto, è utile soffermarsi su un brano della norma:
"È opportuno precisare che l'adozione di barriera al vapore deve essere sempre valutata con molta cautela, in quanto con la sua presenza spesso si possono verificare inconvenienti, tra i quali per esempio:

- *si può verificare una riduzione dell'asciugamento estivo;*
- *nelle strutture con impermeabilizzazione sul lato esterno rispetto all'isolante, l'eventuale umidità presente all'atto della costruzione (getti in opera) non ha più la possibilità di essere smaltita;"*
- *la barriera può perdere con il tempo le sue caratteristiche."*

In queste poche righe sono contenuti gli elementi intorno ai quali costruire una buona verifica igrometrica.

Asciugamento estivo

In Italia, in particolar modo nelle regioni del centro sud, la migrazione del vapore non avviene solo nella stagione invernale dai locali riscaldati verso l'esterno, ma abbiamo un flusso di vapore che percorre la struttura in senso contrario durante i mesi estivi.
A titolo esemplificativo di seguito si riporta una tabella relativa alla media mensile delle temperature esterne massime, umidità relativa e conseguente umidità assoluta, della città di Firenze.

Mese	U.R	Temp. max	H_2O. [gr/Kg]
Gennaio	76	10	5,7
Febbraio	70	12	6
Marzo	66	15	7
Aprile	68	19	9,3
Maggio	68	23	12
Giugno	68	27	15,2
Luglio	65	31	18,5
Agosto	66	31	18,4
Settembre	69	27	15,5
Ottobre	73	21	11,3
Novembre	76	15	7
Dicembre	78	10	5,9

Tabella 4.13_Andamento temperature ed umidità relativa città di Firenze

Ipotizzando di esaminare un alloggio ove la temperatura interna estiva sia di 26 C° e l'umidità pari al 65%, avremo all'interno dell'abitazione un'umidità assoluta pari a 14 g/kg di aria.

Leggendo la tabella riportata in precedenza si nota che dal mese di giugno a quello di settembre, l'umidità esterna è superiore a quella attesa nell'abitazione. Questo significa che, in questi mesi estivi, il vapore migrerà attraverso la struttura dall'esterno verso l'interno, quindi con una direzione contraria a quella che siamo abituati a immaginare per i mesi freddi. L'inversione del gradiente di umidità fa si che l'asciugatura dell'eventuale condensa interstiziale accumulata nella struttura avvenga anche verso l'interno dell'edificio. Se si "sigilla" dall'interno la struttura per evitare la migrazione del vapore in inverno rischiamo di impedire l'asciugatura estiva.

Umidità di costruzione

Un esempio classico di umidità di costruzione intrappolata dalle barriere al vapore è quello dei getti di completamento su solai di copertura in tavelle di cotto.
In questo tipo di realizzazioni si usa spesso posizionare un foglio di polietilene sull'estradosso del manto di tavelle e successivamente gettare una soletta di cls, di spessore variabile, armata con rete metallica. Sulla soletta viene poi posizionato l'isolante e, a completamento del pacchetto, una guaina impermeabilizzante ed il manto di copertura.
Si comprende bene che l'umidità residua del getto non avrà modo di asciugarsi e tenderà a migrare nello strato di isolante, riducendone la funzionalità.
Nel caso delle costruzioni in legno, essendo queste ultime le costruzioni a secco per eccellenza, la questione dell'umidità di costruzione è meno importante, ma ugualmente si dovrà tenere conto dell'umidità residua del legno o di quella acquisita in fase di cantiere e provvedere ad una stratigrafia che sia in grado di garantire l'asciugatura totale della struttura e di tutti i suoi componenti.

Decadimento prestazionale della barriera al vapore

Oltre al rischio del decadimento delle prestazioni, che è un aspetto da tenere in grande considerazione, è necessario soffermarsi sul fatto che spesso è più semplice apportare piccole variazioni alle stratigrafie anziché affidarsi all'applicazione barriere al vapore che possono essere non correttamente applicate.

Come visto in precedenza è importante evitare la condensa interstiziale per salvaguardare l'integrità e la durabilità della struttura, ma vi è un'altra motivazione, più immediata, che ci impone di controllare la migrazione del vapore nei pacchetti costruttivi: il decadimento della capacità isolante del materiale.
Il miglior isolante esistente in natura è l'aria ferma ed asciutta e la quantità di aria contenuta in un materiale è direttamente proporzionale alla capacità isolante del materiale stesso. Per fare un esempio si guardi alla conduttività termica del laterizio pieno e del porizzato: il miglioramento prestazionale nei porizzati è da attribuire al maggior volume di aria inclusa nella struttura dell'elemento.
Quindi se si formasse della condensa questa si sostituirebbe all'aria presente nel materiale, peggiorandone in maniera sensibile la conduttività termica.
Questo fenomeno avvierebbe un processo che avrebbe, in determinate condizioni, un andamento esponenziale. Infatti se l'acqua condensata peggiora la prestazione isolante del materiale, diviene probabile che in quella posizione la struttura diventi

più fredda e quindi, in condizioni di quantità di vapore costante, la quantità di acqua condensata aumenterebbe.
Siccome si è detto che non è conveniente limitare il flusso del vapore attraverso la struttura con barriere o freni al vapore, diventa importante esaminare altre due peculiarità dei materiali che possono cambiare il comportamento degli isolanti in caso di condensa interstiziale: l'igroscopicità e il peggioramento della trasmittanza in presenza di umidità.

4.2.3 Igroscopicità

Viene definita Igroscopicità la proprietà di un materiale di assorbire acqua. Questa proprietà gioca un ruolo importante nella valutazione dell'idoneità di un materiale isolante ad essere utilizzato in determinate condizioni. Infatti le condense non si formano mai su superfici estese, ma si localizzano puntualmente in corrispondenza di difetti di isolamento o di tenuta all'aria. Utilizzando materiali ad alta igroscopicità si ottiene che l'umidità, eventualmente condensata, venga distribuita su un'ampia superficie. In questo modo la quantità di acqua per unità di superficie scende e si limita quindi il decadimento della proprietà isolante del materiale. Un altro aspetto importantissimo è quello derivante dal fatto che se si rende possibile la distribuzione dell'umidità condensata su un volume il più ampio possibile, l'asciugatura è più veloce perché si può contare su una superficie evaporante estesa.

4.2.4 Peggioramento della trasmittanza in presenza di umidità

Per la valutazione del comportamento del materiale rispetto all'umidità, oltre al parametro di permeabilità al vapore μ e oltre alla capacità igroscopica, si dovrà analizzare anche il comportamento dell'isolante in caso di condensa interstiziale nei termini di peggioramento della conduttività termica.

Property	Sets of conditions			
	I (10 °C)		II (23 °C)	
	a)	b)	a)	b)
Reference temperature	*10* °C	*10* °C	23 °C	23 °C
Moisture	u_{dry} [a]	$u_{23,50}$ [b]	u_{dry} [a]	$u_{23,50}$ [b]
Ageing	aged	aged	aged	aged

a u_{dry} is a low moisture content reached by drying according to specifications or standards for the material concerned.
b $u_{23,50}$ is the moisture content when in equilibrium with air at 23 °C and relative humidity of 50%

Tabella 4.14_Set di condizioni di temperatura ed umidità per il test di conduttività termica dei materiali (Fonte UNI EN ISO 10456).

Nella Tabella 4.14 sono riportati i set di temperatura ed umidità utilizzati per i vari materiali per la determinazione della conduttività termica.
Al variare di queste condizioni la conduttività termica può subire variazioni anche importanti; diviene perciò consigliabile, una volta definita la temperatura e l'umidità di progetto, verificare di quanto le prestazioni del materiale scelto siano variate, adeguando conseguentemente le stratigrafie alle reali prestazioni.
Il metodo di verifica è descritto nella norma UNI EN ISO 10456 al punto 7.3.

Secondo la norma UNI EN ISO 13788, in un periodo di 12 mesi che vanno dal primo mese di accensione dell'impianto di riscaldamento al termine del 12mo mese successivo, è consentito un accumulo di condensa sino ad un quantitativo massimo di 500 gr per metro quadro.
Quindi, se dalla verifica termo-igrometrica, risulterà un accumulo di condensa all'interno della struttura, si dovrà procedere verificando che:

- la quantità di condensa accumulata non ecceda al limite imposto dalla norma
- la condensa accumulata si asciughi completamente prima dell'inizio del successivo periodo di riscaldamento
- il peggioramento della conduttività termica dei materiali in presenza della quantità di acqua risultante dal calcolo, non sia tale da compromettere l'isolamento termico calcolato nel progetto.

In conclusione si deve progettare la struttura in modo che sia permeabile al vapore, per facilitare l'asciugatura, ed insensibile alla condensa, per non ridurre la capacità isolante, evento che porterebbe inevitabilmente all'aumento della quantità di umidità condensata.
Alla luce di queste valutazioni risulta più semplice e più sicuro agire sui seguenti punti:

- scelta di isolanti che reagiscono al meglio in presenza di umidità condensata
- opportuno dimensionamento dello strato isolante, in maniera che dia una buona protezione alle parti della struttura che non devono inumidirsi
- inserimento di elementi che rallentino il flusso del vapore senza costituire delle vere e proprie barriere.

Un materiale interessante per agire su quest'ultimo aspetto della composizione della parete è la cellulosa che funziona da freno al vapore se asciutta e si apre alla diffusione quando umida. Questo meccanismo, emulato negli ultimi anni dalle moderne membrane igro-variabili, permette, in condizioni normali, di limitare la quantità di vapore che penetra nella struttura e, nel caso di umidità eccessiva all'interno della struttura stessa, di aprirsi alla diffusione permettendo una rapida asciugatura degli elementi protetti.

Molto importante, per la corretta funzionalità di una struttura, è il "posizionamento" della zona fredda, quella più a rischio per le condense interstiziali, il più possibile in prossimità di una zona ventilata, riducendo al minimo tutti gli ostacoli ad una veloce asciugatura.
Un buon esempio in questo senso è il cappotto termico; infatti l'isolamento posto nella posizione più esterna possibile protegge la struttura dal raffreddamento, riducendo drasticamente i rischi di condensa sulla struttura stessa.
Se il materiale con cui viene realizzato l'isolamento ha una buona igroscopicità, le condense, che difficilmente sono diffuse ma che normalmente si manifestano puntualmente, vengono distribuite su un'ampia superficie e quindi i tempi di evaporazione diminuiscono sensibilmente.
Perché questo meccanismo possa attivarsi è indispensabile che:

- il materiale coibente sia estremamente igroscopico e permeabile al vapore
- l'intonaco esterno, applicato sul pannello coibente, sia anch'esso igroscopico e permeabile al vapore. Ad esempio, un intonaco a base di calce naturale

risponde perfettamente a questa esigenza.
- non vi siano pitture o rivestimenti che limitino la porosità superficiale dell'intonaco

Gli stessi meccanismi si ripropongono sulle coperture: anche in questo caso la porzione più esterna del pacchetto costruttivo dovrà essere costituita dall'isolante e, per avere una rapida asciugatura, oltre ad una idonea ventilazione, è fondamentale l'utilizzo di isolanti e impermeabilizzanti aperti alla diffusione del vapore.

4.2.5 L'impermeabilità all'aria

Se l'apertura alla diffusione del vapore è di notevole importanza per la durabilità di una struttura, l'impermeabilità all'aria è fondamentale per evitare perdite di quantità ingenti di calore per convezione.
Nelle costruzioni in legno è frequente che errori di posa determinino punti di infiltrazione d'aria. Un'interruzione della tenuta all'aria in una struttura spesso vanifica quanto fatto, a livello progettuale, costruttivo ed economico, per minimizzare le perdite energetiche per diffusione.
Oltre alla perdita di calore, queste infiltrazioni causano abbassamenti della temperatura superficiale delle zone limitrofe alla "falla", creando le condizioni per la formazione di condensa, superficiale o interstiziale, che a lungo andare determinano rischi per l'integrità della struttura e la formazione di muffe, situazione non confortevole per gli utilizzatori della struttura stessa.
Questa ventilazione accidentale, così dannosa, si verifica più frequentemente:
- tra gli accoppiamenti tra elementi costruttivi in legno e cordoli o platee in calcestruzzo
- tra gli accoppiamenti di elementi costruttivi in legno (pannelli, tra copertura e pareti perimetrali ecc)
- tra struttura e serramenti (tra struttura e telaio di porte e finestre)
- nell'imperfetta realizzazione di serramenti
- nel passaggio da interno ed esterno di impianti (cavidotti, impianti ecc).
- nella foratura dei pannelli strutturali per l'alloggiamento di impianti
- nella creazione di discontinuità delle barriere all'aria (teli) per l'inserimento di scatole di derivazione o simili.

Un altro punto critico per la permeabilità all'aria è la facciata esterna nel caso si utilizzino rivestimenti discontinui. Infatti, nel caso di superfici esterne intonacate, la finitura superficiale già assolve la funzione di barriera al vento. Nel caso invece di pareti ventilate o dogati è importante assicurare una buona impermeabilità all'aria tenendo conto della pressione del vento.
Normalmente, in questi casi, si utilizzano teli per facciate che devono avere le seguenti caratteristiche:
- devono essere saldabili, chimicamente o termicamente, in modo da assicurare una buon chiusura anche in caso di vento forte
- devono assicurare una buona impermeabilità all'acqua in caso di pioggia battente e vento forte
- devono essere aperti al passaggio del vapore in modo da non limitare l'asciugatura del pacchetto retrostante
- devono resistere totalmente e illimitatamente alla luce; questi teli, come i teli

sotto-copertura, pur essendo protetti da elementi schermanti, come le doghe o altri elementi estetici, non lavorano mai in condizioni di totale protezione dai raggi solari.

Le accortezze da utilizzare per evitare difetti conseguenti alla mancata tenuta all'aria sono:

- una attenta progettazione e prescrizione dei sistemi di impermeabilità all'aria in fase progettuale
- una attenta verifica della corretta applicazione di tali sistemi
- verifiche strumentali (blower door test) della struttura da effettuarsi nelle varie fasi di avanzamento del cantiere.

La prima verifica da effettuare è sulla certificazione di tenuta all'aria che deve essere fornita dal produttore dell'elemento strutturale (pannello di OSB o X Lam). In assenza di tale certificazione o in caso di elementi strutturali discontinui (tavolato) sarà necessario utilizzare idonei teli di tenuta all'aria opportunamente nastrati o saldati ai sormonti.
In caso invece di elementi costruttivi impermeabili all'aria sarà necessario il presidio delle sole zone di accoppiamento con appositi nastri adesivi o sigillanti da estrudere nella connessione.
Oltre a questi sistemi esistono svariati accessori utili al presidio di corpi passanti ed impianti.
Tutti questi sistemi e relativi accessori hanno un costo infinitamente più basso rispetto ad un eventuale intervento per il ripristino di un errore nella tenuta all'aria!

4.3 • LA SCELTA DELL'ISOLANTE ED IL SUO POSIZIONAMENTO

Con le nozioni illustrate nei paragrafi precedenti si può costruire una griglia riassuntiva delle caratteristiche richieste ad un coibente per procedere ad una scelta corretta del miglior materiale da impiegare nell'isolamento invernale ed estivo.

Parametro		Inverno	Estate
Conduttività Termica	λ	si	si
Spessore	d	si	si
Capacità termica	c	no	si
Massa	ρ	no	si
Permeabilità al vapore	μ	si	si
Igroscopicità		si	si

Tabella 4.15_Griglia riassuntiva caratteristiche isolanti

Per semplificare l'analisi è possibile ridurre la valutazione ai soli parametri termici per poi verificare gli aspetti igrometrici solo per i prodotti che soddisfano le prime condizioni.
In sintesi la verifica termica la possiamo ricondurre a due macro indicatori: la **Resistenza Termica** con al quale si potrà calcolare la **Trasmittanza Termica**, per la valutazione invernale, e la P**rofondità Penetrazione Periodica** e quindi lo **Sfasamento termico** per la valutazione estiva.
Come visto in precedenza le formule da cui si ricavano i due indicatori sono:

- Per la Trasmittanza Termica

$$U = \frac{1}{\Sigma R_{strati}}$$

$$R_{strato} = \frac{d}{\lambda}$$

- Per Profondità Penetrazione Periodica

$$\delta = \sqrt{\frac{\lambda \cdot T}{\pi \cdot \rho \cdot c}}$$

Siccome si utilizzerà lo stesso materiale per l'isolamento invernale e quello estivo, sarà necessario tendere all'utilizzo di un prodotto che, a parità di spessore, ci dia la massima resistenza e la minima profondità di penetrazione.

Per poter meglio definire le valutazioni attraverso cui scegliere un materiale isolante e la posizione in cui collocare l'isolante stesso, si possono simulare alcuni esempi di struttura.

Parete perimetrale

Pur avendo il legno un buon comportamento nella resistenza alla conduzione del calore, visti i bassi spessori utilizzati con le più diffuse tecnologie costruttive, diventa necessario completare la costruzione con un sistema di isolamento termico.

La tecnica comunemente utilizzata per isolare la parete esterna della costruzione in legno è quella del "cappotto", ovvero un pannello isolante esterno, intonacato, applicato e meccanicamente vincolato alla struttura.
Questo sistema permette di mantenere la struttura "calda" riducendo cosi il rischio di condense superficiali ed interstiziali; inoltre l'isolante collocato nella zona più esterna ha il vantaggio di godere di una buona ventilazione.
Comunemente si prevede la rasatura superficiale del pannello con malte e la successiva coloritura con finitura in pasta o pitture murali. Entrambi gli strati, sia rasatura che finitura superficiale, devono essere aperti alla diffusione per poter far si che il pannello, accidentalmente inumidito da acqua penetrata dall'esterno o da condense interstiziali, possa prontamente asciugarsi, ma, contemporaneamente, devono dare al sistema una buona protezione dalle piogge battenti sulla superficie del cappotto stesso.

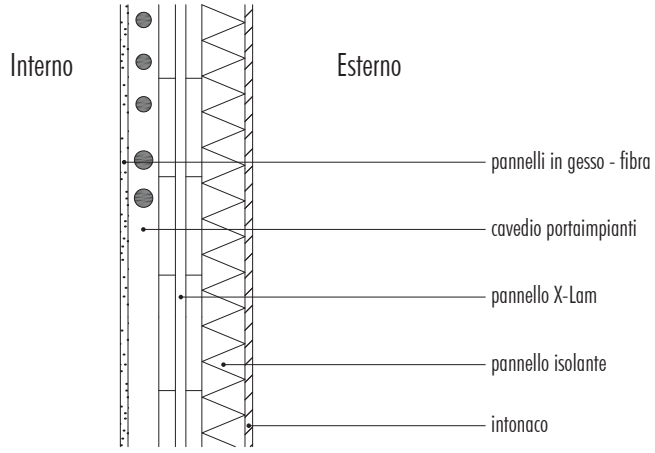


Figura 4.7_Schema di parete in X-Lam + cappotto esterno e cavedio impianti

Un'alternativa alla finitura con intonaco è la parete ventilata. Questa viene realizzata applicando il pannello isolante alla parete, predisponendo uno strato traspirante di tenuta al vento ed all'acqua a protezione dell'isolante e rivestendo il tutto con elementi discontinui in diversi materiali (cotto, ceramica, metalli, legno ecc) montati su struttura in legno e/o metallica a sua volta vincolata alla parete da rivestire. Il montaggio di quest'ultimo strato è realizzato in modo da formare un'intercapedine ventilata che ha lo scopo di determinare la formazione di una lama d'aria continua che lambisce la superficie dell'isolante, smaltendone l'umidità che si dovesse formare e riducendo la temperatura dello stesso nei mesi estivi.

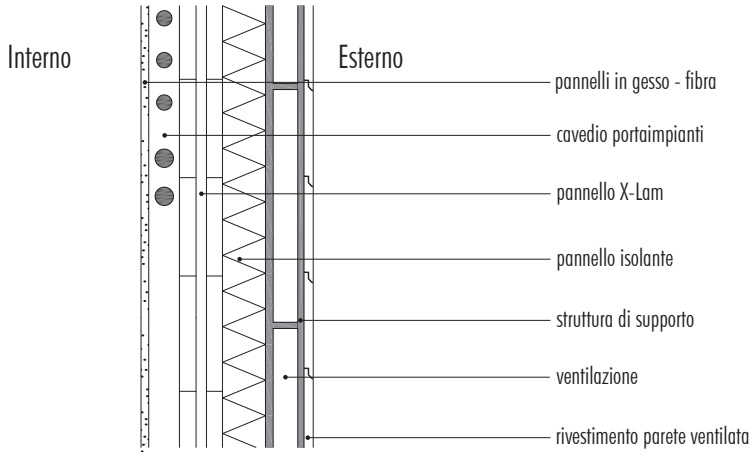


Figura 4.8_Schema di parete in X-Lam + isolamento esterno e parete ventilata

Come evidenziato nelle figure precedenti, nel sistema di isolamento a cappotto su costruzioni in legno, la struttura, normalmente, è dotata di due strati isolanti:

- il primo, esterno, è lo strato a cui ci si affida per l'isolamento termico vero e proprio
- il secondo, all'interno del cavedio impianti, ha più una funzione di coibentazione acustica.

Per l'isolamento a cappotto vengono utilizzati preferibilmente pannelli con una buona resistenza meccanica mentre per il riempimento del cavedio si possono utilizzare materiali fibrosi o sciolti che meglio si prestano al riempimento di volumi irregolari.

Per poter valutare il comportamento del materiale isolante da collocare all'esterno, si può simulare una parete di X Lam da 100 mm dalla quale si voglia ottenere un $U = 0{,}24\ W/m^2\ K$ ed uno sfasamento termico di 12 ore.
Per raggiungere questo risultato si proveranno vari tipi di isolanti (riportati nelle tabelle seguenti), variando lo spessore in funzione della prestazione che si dovrà ottenere. Ogni pannello isolante sarà rasato con 7 mm di malta a base di calce naturale.

Per semplificare la lettura, in questa prova, si eliminerà il cavedio impianti ed il relativo coibente fibroso, affidando cosi l'isolamento al solo pannello esterno.

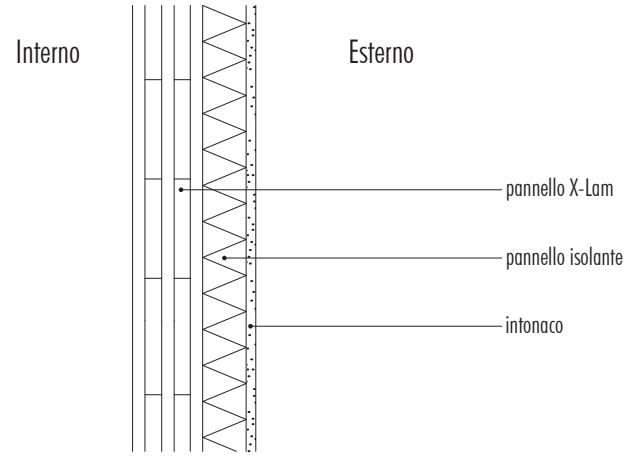


Figura 4.9_Schema di parete in X-Lam + cappotto esterno

I materiali di seguito descritti sono quelli che maggiormente si impiegano nelle applicazioni a cappotto e che verranno testati nelle tabelle successive:

Materiale	Conduttività termica [W/mk]	Calore Specifico [J/kg·K]	Massa volumica [kg/m^3]
Fibra di vetro	0,039	1030	100
Lana di roccia	0,036	1030	100
XPS	0,036	1450	20
EPS	0,032	1450	15
Poliuretano espanso	0,026	1464	35
Sughero espanso	0,043	1880	140
Calcio silicato	0,043	1300	115
Fibra di legno	0,040	2100	160

Tabella 4.16_ Principali materiali isolanti per cappotto esterno

Comparazione tra le prestazione di diversi isolanti nell'applicazione a cappotto esterno su struttura in legno

Fibra di Vetro			
Dato	Simbolo	U.M.	Valore
Massa volumica	ρ	Kg/mc	100
Conducibilità termica	λ	W/m K	0,039
Calore specifico	X	j/Kg·K	1030
Penetrazione termica periodica	δ	m	0,102
Resistenza igroscopica	μ	-	1
Note			
Materiale di origine minerale Classe di reazione al fuoco secondo EN 13501-1= A1			
Prestazione su parete X Lam mm 100			
Isolamento invernale	Obiettivo	Spessore	
Dato	$W/m_2 \cdot K$	mm	
Trasmittanza termica	0,24	125	
Isolamento estivo	Obiettivo	Spessore	
Dato	ore	mm	
Sfasamento termico	12	225	

Lana di roccia			
Dato	Simbolo	U.M.	Valore
Massa volumica	ρ	Kg/mc	100
Conducibilità termica	λ	W/m K	0,036
Calore specifico	X	j/Kg·K	1030
Penetrazione termica period ica	δ	m	0,098
Resistenza igroscopica	μ	-	1
Note			
Materiale di origine minerale Classe di reazione al fuoco secondo EN 13501-1= A1			
Prestazione su parete X Lam mm 100			
Isolamento invernale	Obiettivo	Spessore	
Dato	$W/m_2 \cdot K$	mm	
Trasmittanza termica	0,24	115	
Isolamento estivo	Obiettivo	Spessore	
Dato	ore	mm	
Sfasamento termico	12	220	

Polistirene Espanso Estruso - XPS			
Dato	Simbolo	U.M.	Valore
Massa volumica	ρ	Kg/mc	20
Conducibilità termica	λ	W/m K	0,036
Calore specifico	X	¡/Kg·K	1450
Penetrazione termica periodica	δ	m	0,185
Resistenza igroscopica	μ	-	100
Note			
Materiale di origine petrolchimica Classe di reazione al fuoco secondo EN 13501-1= E			
Prestazione su parete X Lam mm 100			
Isolamento invernale	Obiettivo		Spessore
Dato	$W/m_2 \cdot K$		mm
Trasmittanza termica	0,24		115
Isolamento estivo	Obiettivo		Spessore
Dato	ore		mm
Sfasamento termico	12		415

Polistirene Espanso Sinterizzato - EPS			
Dato	Simbolo	U.M.	Valore
Massa volumica	ρ	Kg/mc	19
Conducibilità termica	λ	W/m K	0,032
Calore specifico	X	¡/Kg·K	1450
Penetrazione termica periodica	δ	m	0,179
Resistenza igroscopica	μ	-	40
Note			
Materiale di origine petrolchimica Classe di reazione al fuoco secondo EN 13501-1= E			
Prestazione su parete X Lam mm 100			
Isolamento invernale	Obiettivo		Spessore
Dato	$W/m_2 \cdot K$		mm
Trasmittanza termica	0,24		110
Isolamento estivo	Obiettivo		Spessore
Dato	ore		mm
Sfasamento termico	12		460

Schiuma di Poliuretano- PU			
Dato	Simbolo	U.M.	Valore
Massa volumica	ρ	Kg/mc	35
Conducibilità termica	λ	W/m K	0,026
Calore specifico	X	j/Kg·K	1464
Penetrazione termica periodica	δ	m	0,118
Resistenza igroscopica	μ	-	56
Note			
Materiale di origine petrolchimica Classe di reazione al fuoco secondo EN 13501-1= E			
Prestazione su parete X Lam mm 100			
Isolamento invernale	Obiettivo	Spessore	
Dato	$W/m_2 \cdot K$	mm	
Trasmittanza termica	0,24	85	
Isolamento estivo	Obiettivo	Spessore	
Dato	ore	mm	
Sfasamento termico	12	265	

Sughero			
Dato	Simbolo	U.M.	Valore
Massa volumica	ρ	Kg/mc	140
Conducibilità termica	λ	W/mK	0,043
Calore specifico	X	j/Kg·K	1880
Penetrazione termica periodica	δ	m	0,067
Resistenza igroscopica	μ	-	10
Note			
Materiale di origine naturale Classe di reazione al fuoco secondo EN 13501-1 = E			
Prestazione su parete X Lam mm 100			
Isolamento invernale	Obiettivo	Spessore	
Dato	$W/m_2 \cdot K$	mm	
Trasmittanza termica	0,24	140	
Isolamento estivo	Obiettivo	Spessore	
Dato	ore	mm	
Sfasamento termico	12	150	

Silicato di calcio			
Dato	Simbolo	U.M.	Valore
Massa volumica	ρ	Kg/mc	115
Conducibilità termica	λ	W/m K	0,043
Calore specifico	X	j/Kg·K	1300
Penetrazione termica periodica	δ	m	0,089
Resistenza igroscopica	μ	-	3
Note			
Materiale di origine minerale Classe di reazione al fuoco secondo EN 13501-1= A1			
Prestazione su parete X Lam mm 100			
Isolamento invernale	Obiettivo		Spessore
Dato	$W/m_2 \cdot K$		mm
Trasmittanza termica	0,24		140
Isolamento estivo	Obiettivo		Spessore
Dato	ore		mm
Sfasamento termico	12		200

Fibra di legno			
Dato	Simbolo	U.M.	Valore
Massa volumica	ρ	Kg/mc	150
Conducibilità termica	λ	W/m K	0,040
Calore specifico	X	j/Kg·K	2100
Penetrazione termica periodica	δ	m	0,059
Resistenza igroscopica	μ	-	5
Note			
Prestazione su parete X Lam mm 100			
Isolamento invernale	Obiettivo		Spessore
Dato	$W/m_2 \cdot K$		mm
Trasmittanza termica	0,24		125
Isolamento estivo	Obiettivo		Spessore
Dato	ore		mm
Sfasamento termico	12		135

Nelle tabelle precedenti possiamo notare che la maggior parte degli isolanti hanno un comportamento estremamente difforme tra inverno ed estate. Fanno eccezione gli isolanti naturali (fibra di legno e sughero) che sono caratterizzati da una discreta **Trasmittanza Termica**, buona massa e alto **Calore Specifico**.

A titolo di riepilogo di seguito si possono osservare i comportamenti dei materiali esaminati:

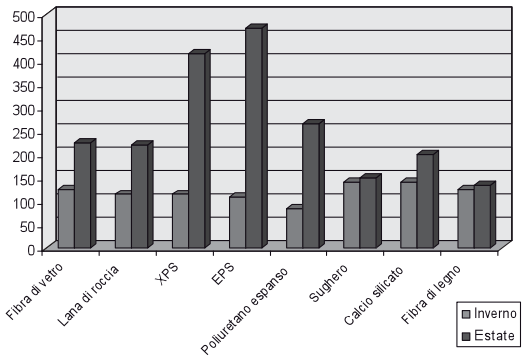


Figura 4.10_Schema riassuntivo spessori isolanti su cappotto esterno.

Copertura

Anche sulle coperture la soluzione tecnicamente ottimale è il posizionamento dell'isolante immediatamente sotto il manto di copertura.
La coibentazione della copertura deve essere accurata quanto, se non più, della coibentazione in parete. Infatti, se è vero che in termini di estensione superficiale le pareti perimetrali "pesano" molto nel calcolo delle dispersioni, è anche vero che il tetto, per la sua posizione, è la porzione dell'edificio maggiormente sollecitata in estate e meno protetta d'inverno.

Nel caso di coperture a falde, l'isolante sarà posato sul solaio inclinato, avendo cura di interporre uno strato di tenuta all'aria (dalla banale carta Kraft a teli più raffinati come le barriere igrovariabili).
Al di sopra dell'isolante, composto negli strati e spessori opportuni, si posizionerà un manto traspirante impermeabile e un sistema di listelli, vincolato direttamente alla struttura, tale da costituire una corretta ventilazione consistente in una lama d'aria continua, di circa 40/50 mm che si originerà alla linea di gronda e terminerà alla linea di colmo.

Con un procedimento analogo a quello visto in precedenza per il cappotto si può verificare il comportamento di ogni materiale su una struttura leggera, costituita da:
- doppio tavolato 20 mm + 20 mm
- carta Kraft
- pannello isolante
- ventilazione da 50 mm

Tutti gli strati successivi alla ventilazione non vengono presi in considerazione nel calcolo e quindi si possono trascurare.

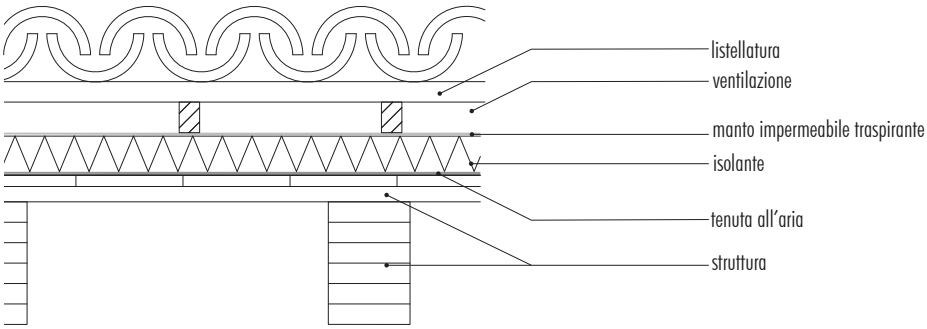


Figura 4.11_Schema di copertura ventilata

Gli obiettivi prestazionali saranno:
- trasmittanza termica U = 0,24 W/m2 K
- sfasamento termico di 12 ore.

I materiali utilizzati in questa prova sono i seguenti:

Materiale	Conduttività termica [W/mk]	Calore Specifico [J/kg·K]	Massa volumica [kg/m^3]
Fibra di vetro	0,039	1030	30
Lana di roccia	0,036	1030	130
XPS	0,034	1450	35
EPS	0,038	1450	25
Poliuretano espanso	0,026	1464	35
Sughero espanso	0,043	1880	140
Fibra di legno	0,040	2100	140

Tabella 4.17_Griglia riassuntiva caratteristiche isolanti per copertura ventilata

Comparazione tra le prestazione di diversi isolanti nell'applicazione su copertura ventilata su struttura in doppio tavolato.

Fibra di Vetro			
Dato	Simbolo	U.M.	Valore
Massa volumica	ρ	Kg/mc	30
Conducibilità termica	λ	W/m K	0,039
Calore specifico	X	j/Kg·K	1030
Penetrazione termica periodica	δ	m	0,186
Resistenza igroscopica	μ	-	1
Note			
Materiale di origine minerale Classe di reazione al fuoco secondo EN 13501-1= A1 Prestazione su parete X Lam mm 100			
Isolamento invernale	Obiettivo		Spessore
Dato	$W/m_2·K$		mm
Trasmittanza termica	0,24		125
Isolamento estivo	Obiettivo		Spessore
Dato	ore		mm
Sfasamento termico	12		225

Lana di roccia			
Dato	Simbolo	U.M.	Valore
Massa volumica	ρ	Kg/mc	100
Conducibilità termica	λ	W/m K	0,036
Calore specifico	X	j/Kg·K	1030
Penetrazione termica period ica	δ	m	0,086
Resistenza igroscopica	μ	-	1
Note			
Materiale di origine minerale Classe di reazione al fuoco secondo EN 13501-1= A1			
Prestazione su parete X Lam mm 100			
Isolamento invernale	Obiettivo		Spessore
Dato	$W/m_2·K$		mm
Trasmittanza termica	0,24		115
Isolamento estivo	Obiettivo		Spessore
Dato	ore		mm
Sfasamento termico	12		220

Polistirene Espanso Estruso - XPS			
Dato	Simbolo	U.M.	Valore
Massa volumica	ρ	Kg/mc	20
Conducibilità termica	λ	W/m K	0,036
Calore specifico	X	j/Kg·K	1450
Penetrazione termica periodica	δ	m	0,136
Resistenza igroscopica	μ	-	100
Note			
Materiale di origine petrolchimica Classe di reazione al fuoco secondo EN 13501-1 = E			
Prestazione su parete X Lam mm 100			
Isolamento invernale	Obiettivo		Spessore
Dato	$W/m_2 \cdot K$		mm
Trasmittanza termica	0,24		115
Isolamento estivo	Obiettivo		Spessore
Dato	ore		mm
Sfasamento termico	12		415

Polistirene Espanso Sinterizzato - EPS			
Dato	Simbolo	U.M.	Valore
Massa volumica	ρ	Kg/mc	19
Conducibilità termica	λ	W/m K	0,032
Calore specifico	X	j/Kg·K	1450
Penetrazione termica periodica	δ	m	0,174
Resistenza igroscopica	μ	-	40
Note			
Materiale di origine petrolchimica Classe di reazione al fuoco secondo EN 13501-1= E			
Prestazione su parete X Lam mm 100			
Isolamento invernale	Obiettivo		Spessore
Dato	$W/m_2 \cdot K$		mm
Trasmittanza termica	0,24		110
Isolamento estivo	Obiettivo		Spessore
Dato	ore		mm
Sfasamento termico	12		460

Schiuma di Poliuretano- PU			
Dato	Simbolo	U.M.	Valore
Massa volumica	ρ	Kg/mc	35
Conducibilità termica	λ	W/m K	0,026
Calore specifico	X	j/Kg·K	1464
Penetrazione termica periodica	δ	m	0,118
Resistenza igroscopica	*μ*	-	56
Note			
Materiale di origine petrolchimica Classe di reazione al fuoco secondo EN 13501-1= E			
Prestazione su parete X Lam mm 100			
Isolamento invernale	Obiettivo		Spessore
Dato	$W/m_2 \cdot K$		mm
Trasmittanza termica	0,24		90
Isolamento estivo	Obiettivo		Spessore
Dato	ore		mm
Sfasamento termico	12		360

Sughero			
Dato	Simbolo	U.M.	Valore
Massa volumica	ρ	Kg/mc	140
Conducibilità termica	λ	W/m K	0,043
Calore specifico	X	j/Kg·K	1880
Penetrazione termica periodica	δ	m	0,067
Resistenza igroscopica	*μ*	-	10
Note			
Materiale di origine naturale Classe di reazione al fuoco secondo EN 13501-1 = E			
Prestazione su parete X Lam mm 100			
Isolamento invernale	Obiettivo		Spessore
Dato	$W/m_2 \cdot K$		mm
Trasmittanza termica	0,24		150
Isolamento estivo	Obiettivo		Spessore
Dato	ore		mm
Sfasamento termico	12		195

Fibra di legno			
Dato	Simbolo	U.M.	Valore
Massa volumica	ρ	Kg/mc	140
Conducibilità termica	λ	W/m K	0,038
Calore specifico	X	j/Kg·K	2100
Penetrazione termica periodica	δ	m	0,06
Resistenza igroscopica	μ	-	5
Note			
Prestazione su parete X Lam mm 100			
Isolamento invernale	Obiettivo		Spessore
Dato	$W/m_2 \cdot K$		mm
Trasmittanza termica	0,24		135
Isolamento estivo	Obiettivo		Spessore
Dato	ore		mm
Sfasamento termico	12		175

Le differenze che si riscontrano nelle tabelle precedenti rispetto all'analisi relativa al cappotto esterno sono da imputare a:

- una differenza nella qualità e quindi nella prestazione di isolamento termico del coibente, nei pannelli destinati alla copertura rispetto a quelli destinati al cappotto
- nel caso preso in esame manca il contributo del pannello X Lam, sostituito dal doppio tavolato incrociato.

Come si può osservare nei dettagli precedenti e nel riepilogo che segue, anche nel caso della copertura, si evidenziano i diversi comportamenti tra gli isolanti sintetici e gli isolanti naturali, con la riconferma della maggiore idoneità di questi ultimi all'utilizzo su strutture leggere.

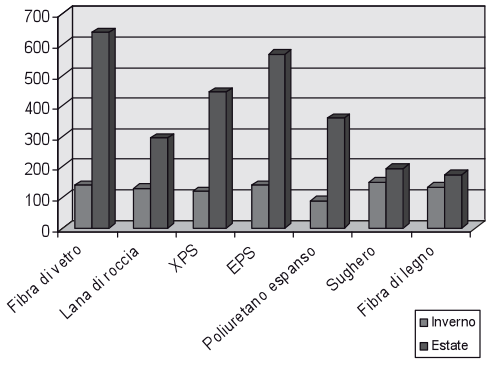


Figura 4.12_Schema riassuntivo prestazioni isolanti su copertura ventilata.

4.4 • ISOLAMENTO ACUSTICO NEGLI EDIFICO IN LEGNO

Come per l'isolamento termico, anche la realizzazione di un buon isolamento acustico negli edifici in legno, non implica l'impiego di tecnologie o materiali diversi da quelli utilizzati nelle strutture tradizionali.
Come già accennato nei paragrafi precedenti, anche in questo caso, è necessaria in fase di progettazione, una stretta compenetrazione tra le attività dei vari professionisti – progettisti strutturali, architettonici ed impiantisti – per ottenere il massimo risultato con un attento contenimento dei costi.

Le strutture in legno, se ben progettate, con le loro particolarità costruttive (cappotto esterno, contropareti interne, divisori a secco ecc), si prestano molto bene ad eseguire interventi di isolamento acustico ad alte prestaziozni.

Il rumore

Il rumore è un suono, di origine naturale (fruscio delle foglie di un albero mosse dal vento) o artificiale (rock band), che viene percepito soggettivamente come fastidioso.
Il suono è la sensazione, elaborata dagli organi uditivi e dal sistema nervoso, generata da un corpo in oscillazione.
Se il mezzo in cui il suono si propaga è l'aria, un corpo che oscilla - periodicamente attorno alla sua posizione di equilibrio - mette in movimento le particelle dell'aria intorno a se. A loro volta le particelle d'aria propagheranno il movimento oscillatorio ad altre particelle generando una perturbazione di pressione che, raggiunge l'orecchio e viene "interpretata" come suono.
La differenza di pressione generata dalla perturbazione rispetto alla pressione di quiete è detta pressione efficace o pressione sonora. Per rappresentare l'ampio intervallo di pressione sonora che il nostro apparato uditivo è in grado di percepire sono stati introdotti i livelli sonori.
Questi utilizzano una scala logaritmica la cui unità di misura è la decima parte del Bel e viene chiamata decibel (*dB*).
Le onde sonore sono inoltre caratterizzate da:

1. **frequenza** (*f*) misurata in Hertz [Hz] cioè le oscillazioni compiute in un secondo;
2. **periodo** (*T*) misurato in secondi [s] cioè il tempo necessario per compiere un'oscillazione completa
3. **lunghezza d'onda** (λ) misurata in metri [m] cioè lo spazio in cui si svolge un'oscillazione completa formata da una compressione e da una rarefazione.

Quale metodo si può utilizzare per capire quale suono può essere percepito come rumore e quindi da quali tipi di suoni dobbiamo isolare una abitazione?
Per semplificare il problema ed allo stesso tempo dare una definizione che aiuti a risolverlo, si potrebbe affermare che il *suono* diviene *rumore* nel momento in cui un soggetto si trova nell'impossibilità di "gestire" questo suono, lo subisce sino al punto che il suono, non gestibile, disturba l'equilibrio psicofisico del soggetto stesso; ad esempio un vicino che ascolta una melodia ad alto volume mentre si

tenta di dormire interferisce con la necessità di silenzio e si è costretti a subire l'ascolto: ecco che la melodia diviene rumore.
Quindi per capire da cosa si devono isolare le abitazioni è necessario allargare l'orizzonte di osservazione, ovvero non limitando l'esame ai *rumori* classici (ascensore, calpestio, impianti ecc) ma garantendo un totale isolamento da qualsiasi fonte sonora esterna all'abitazione stessa.

A livello legislativo in Italia si occupa di questo il DPCM 5-12-1997, emanato in adempimento a quanto previsto dalla legge quadro sull'inquinamento acustico, la n°447 del 1995, e in vigore dal 28 febbraio del 1998. Questo DPCM tratta appunto i "requisiti acustici passivi degli edifici" ed impone una serie di indicatori di prestazione che devono essere verificati in opera a seguito di un collaudo strumentale. I cinque indicatori di prestazione previsti dal decreto sono riportati nella sottostante tabella; i primi due R'w e D2m,nT,W rappresentano dei valori a singolo numero detti indici minimi di prestazione i rimanenti tre rappresentano dei valori a singolo numero detti indici massimi di immissione. La distinzione ai fini del rispetto della normativa è fondamentale in quanto in opera dovremo misurare valori maggiori o uguali ai primi due indici mentre minori o uguali ai rimanenti tre.

Categorie ambienti abitativi	*Parametri [dB]*				
	R'_W	$D_{2m,nT,W}$	L'_W	$L_{AS,max}$	L_{Aeq}
Edifici adibiti ad ospedali, cliniche, case di cura e assimilabili	55	45	58	35	25
Edifici adibiti a residenze, alberghi, pensioni ed attività assimilabili	50	40	63	35	35
Edifici adibiti ad attività scolastiche a tutti i livelli e assimilabili	50	48	58	35	25
Edi fici adibiti ad uffici, attività ricreative o di culto, attività commerciali o assimilabili	50	42	55	35	35

Tabella 4.18_Requisiti acustici passivi degli edifici secondo DPCM 5-12-1997

L'isolamento dal rumore è estremamente più complicato da ottenere rispetto all'isolamento termico, poiché non esistono materiali isolanti acustici che svolgono un'azione simile a quella dell'isolante termico che posto davanti ad una struttura impedisce la perdita del calore. Questa complessità deriva dalla estrema variabilità qualitativa del rumore (diverse frequenze ognuna a livelli di pressione diversa) e

dal fatto che i materiali comunemente utilizzati nelle costruzioni, sia tradizionali sia in legno, hanno un comportamento in termini di isolamento acustico assai diverso al variare delle frequenze. Quindi non essendoci un materiale che vada bene per qualsiasi tipo di rumore, per ogni rumore si dovranno utilizzare materiali e tecnologie diversi, definendo sistemi complessi attraverso i quali si potrà ottenere l'isolamento acustico.

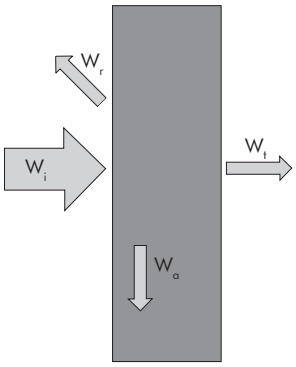
I rumori che si dovranno prendere in considerazione trattando l'isolamento acustico di un edificio, originati sia all'interno che all'esterno della costruzione, sono di due tipi:
- Rumori aerei;
- Rumori d'impatto.

I rumori aerei

I rumori aerei sono generati dalla voce delle persone, dal pianto di bambini, da elettrodomestici in funzione ecc..
Questo tipo di rumore si propaga attraverso l'aria nelle strutture che incontra e frequentemente riesce a giungere anche negli ambienti confinanti con quello dove esso è generato. Infatti l'onda sonora incidendo sull'elemento divisorio lo mette in vibrazione e parte della sua energia "attraversa" la struttura di separazione giungendo nell'ambiente confinante.
Non tutta l'energia che ha colpito la parete si riproporrà dalla parte opposta sotto forma di fenomeno sonoro: una parte si trasformerà in calore perdendosi all'interno della struttura ed una parte rimbalzerà dando luogo al fenomeno del riverbero.
Le quantità di energia che attraverserà il componente divisorio dipende da diversi fattori fra i quali:
1. dimensioni e geometria dell'elemento divisorio;
2. dimensioni e geometria delle due stanze e degli elementi confinanti con l'elemento divisorio;
3. natura dei materiali e loro assemblaggio;
4. frequenze che caratterizzano le onde acustiche.

La differenza, in decibel, tra il livello di rumore nella stanza ove è collocata la sorgente sonora e la stanza dove avviene la misurazione definisce l'**isolamento acustico** (**D**). Questa grandezza dipende dalla qualità dell'onda sonora, dalle caratteristiche delle stanze e da quelle del divisorio.
Se consideriamo una quantità unitaria di potenza acustica incidente Wi su un componente divisorio, come nella figura sotto riportata, osserviamo che questa si scompone in tre componenti:
1. parte riflessa che indicheremo con "W_r";
2. parte assorbita dall'elemento divisorio che indicheremo con "W_a";
3. parte trasmessa attraverso l'elemento divisorio che indicheremo con "W_t".

$$W_i = W_r + W_a + W_t \qquad [4.1]$$



Se dividiamo tutto per W_i

$$\frac{W_i}{W_i} = \frac{W_r}{W_i} + \frac{W_a}{W_i} + \frac{W_t}{W_i} \qquad [4.2]$$

Otteniamo:

$$1 = r + a + t$$

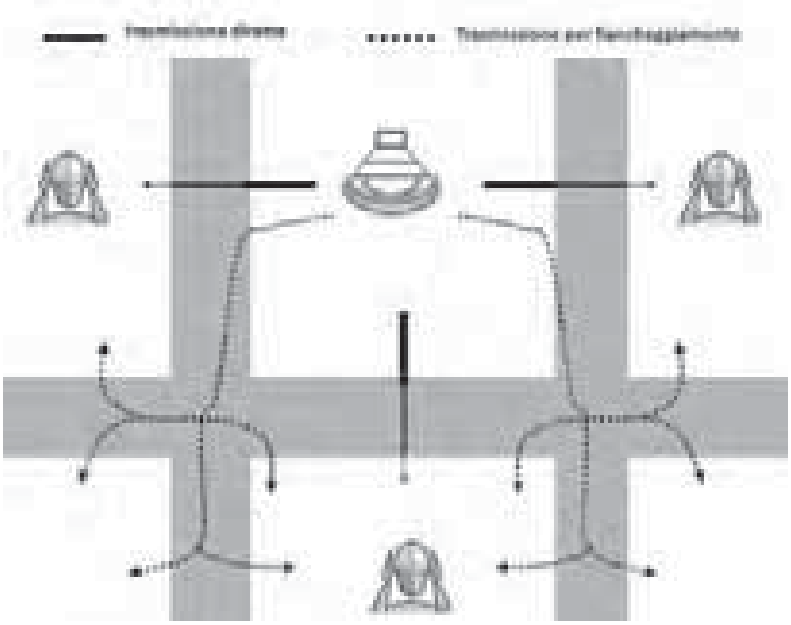


Figura 4.13_Percorsi di trasmissione rumore aereo

Per poter quantificare la capacità di una struttura di attutire i rumori si valuta il **potere fonoisolante** (**R**) della struttura stessa.
Questo è definito come il logaritmo dell'inverso di "*t*" (coefficiente di trasmissione).

$$R = 10 \log\left(\frac{1}{t}\right) \qquad [4.3]$$

Come già visto, generalmente i suoni sono composti da più frequenze diverse ed ogni frequenza ha un comportamento diverso sia nell' attraversamento dei sistemi fonoisolanti sia per ciò che riguarda la riflessione sulle strutture.
Per avere un parametro unico grazie al quale si possa mettere velocemente a confronto strutture e materiali diversi si sono definiti degli **indici di valutazione** che si ottengono elaborando i dati sperimentali alle varie frequenze ottenuti in laboratorio, confrontando questi con dati costituenti una curva in frequenza di

riferimento ed infine, mediante la procedura descritta nella norma UNI EN ISO 717 - 1, assegnando quale valore R_w quello misurato alla frequenza di 500Hz.
Gli indici di valutazione sono riconoscibili poiché affiancati dal pedice W. Quindi R_w contrassegnerà il valore di fonoisolamento elaborato secondo la UNI EN ISO 717-1.

I rumori da impatto

I rumori di impatto sono quelli generati dalla percussione di un corpo solido contro una parte dell'edificio: in questo caso una parte dell'energia scaricata dall'impatto verrà trasformata in vibrazione e, se non confinati da un buon sistema di isolamento acustico, si propagheranno a tutte le strutture rigidamente collegate a quella che ha subito l'impatto con meccanismi del tutto simili a quelli della propagazione dei rumori aerei. I rumori impattivi, salvo casi isolati, interessano il sistema pavimento/solaio. A titolo di esempio: il calpestio dei tacchi su un pavimento, il martello che pianta il chiodo nel muro, una sedia trascinata sul pavimento, ecc. sono rumori di origine impattiva.
Un buon metodo per ridurre la propagazione del rumore è quello di interporre tra il pavimento, quindi l'elemento che riceve l'impatto, e il solaio, ovvero la struttura che lo re-irradia, un elemento resiliente che ridurrà il livello in sonoro in maniera sostanziale.

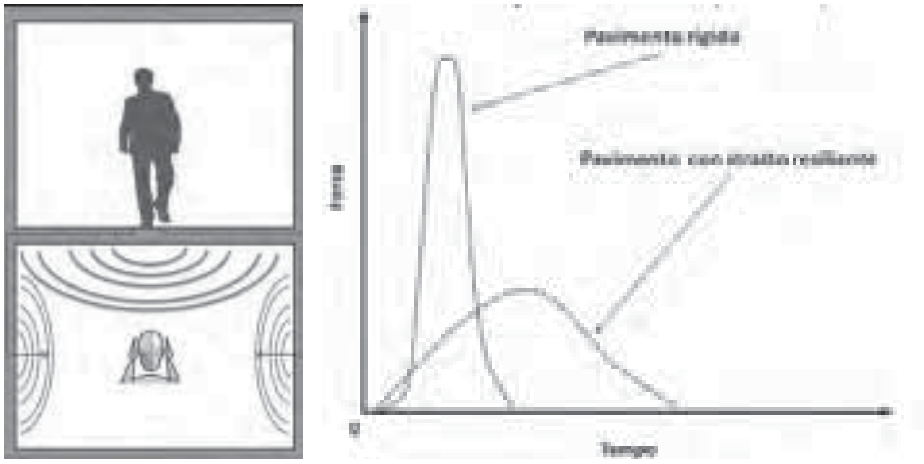


Figura 4.14_Rumori da impatto. A destra: Andamento della forza impattiva rispetto al tempo. Nel caso di materiali rigidi e materiali resilienti posti sotto il pavimento

Quando un materiale rigido va ad urtare contro un altro materiale rigido la forza derivante dall'impatto viene trasferita in un breve tempo generando un picco elevato (vedi figura). L'urto genera rumore e vibrazioni aventi uno spetro di frequenze molto ampio. Mentre se l'impatto avviene fra un materiale con caratteristiche resilienti e uno rigido (o se entrambi hanno caratteristiche resilienti), la forza derivante dall'impatto viene trasferita in un tempo maggiore generando un picco più basso. Questo è dovuto alla deformazione del materiale (o dei materiali) resiliente.

La capacità di deformazione elastica di un materiale soggetto ad un impatto è descritta dalla **rigidità dinamica** cioè dal rapporto tra la forza dinamica e lo spostamento dinamico.
Questa si calcola secondo la norma UNI EN 29052 parte 1 del 1993.

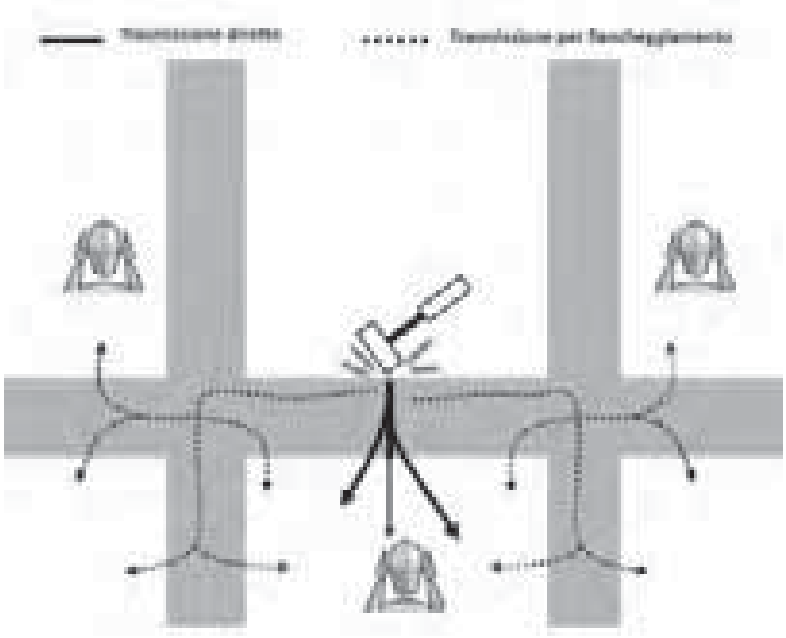


Figura 4.15_Percorsi di trasmissione rumore da impatto.

Fonoassorbimento

Per comprendere come i materiali che compongono le strutture che ci circondano influenzano la trasmissione del suono si provi ad esaminare il fenomeno del riverbero:
in una stanza con un impianto stereo acceso si ascolterà la musica proveniente direttamente dagli altoparlanti e quella che, colpendo le pareti ne verrà riflessa giungendo sino all'orecchio dell'ascoltatore. Questo fenomeno è consistente, al punto che, dal momento in cui l'altoparlante cessa di funzionare a quando l'ultima onda sonora emessa da esso arriva al nostro orecchio, passa un tempo più o meno lungo (da qualche decimo di secondo ad alcuni secondi) in funzione dei materiali che compongono il rivestimento delle pareti e dei solai che delimitano l'ambiente. La durata di questa coda sonora viene denominata **tempo di riverberazione**. Questi tempi, per un edificio residenziale, variano normalmente dai 0,4 ai 0,7 secondi mentre per una palestra possono arrivare a 1,3 / 2 secondi.
Queste differenze di comportamento rispetto al riverbero, oltre che dalla geometria della stanza e dal suo volume, dalla qualità dell'onda sonora, (cioè con diverse lunghezze d'onda si avranno tempi di riverbero diversi), dipendono in misura importante dalle caratteristiche dei materiali di rivestimento delle strutture. Infatti non tutti i materiali riflettono il suono nella stessa maniera: esistono materiali

la cui superficie è particolarmente liscia e compatta (lastre di marmo, ceramica ecc.) che rifletteranno l'onda sonora praticamente immutata, mentre altri, scabri e porosi, assorbiranno parte dell'onda sonora.
Ciò accade perché sui materiali porosi, fibrosi o scabri le particelle di aria, per attrito, dissipano energia che si trasforma in calore.
Questa caratteristica dei materiali è definita **fonoassorbimento** e l'utilizzo di materiali più o meno fonoassorbenti determina tempi di riverberazione più o meno lunghi.
Come visto, anche in questo caso i materiali non rispondono in maniera omogenea a tutte le lunghezze d'onda, ma la capacità fonoassorbente è legata alla qualità dell'onda sonora.
A titolo di esempio si riporta nel grafico sottostante il variare del coefficiente apparente di assorbimento acustico in funzione dell'angolo di incidenza che l'onda sonora crea rispetto alla normale della superficie considerata.

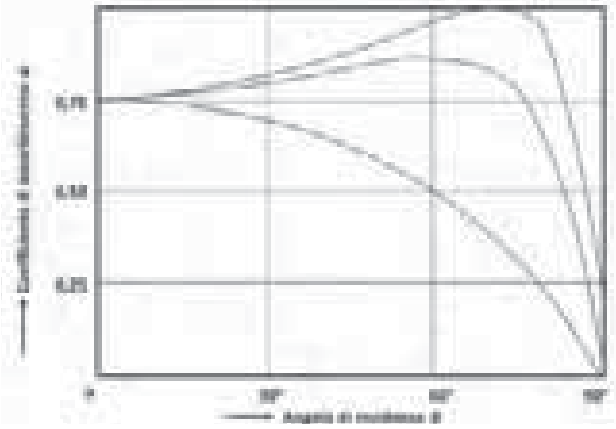


Figura 4.16_ Assorbimento acustico al variare dell'angolo di incidenza.

Le norme UNI EN ISO 354:2003, *"Acoustics-Measurement of sound absorbition in a reverberation room"* e UNI EN ISO 11654:1998 *"Acustica - Assorbitori acustici per l'edilizia - Valutazione dell'assorbimento acustico"*, sono lo strumento che permette di convertire i valori del coefficiente di assorbimento acustico dipendenti dalla frequenza in un indice di valutazione unico.
Si deve sottolineare che non esiste un riverbero ottimale per qualsiasi ambiente, ma a seconda della destinazione d'uso di ogni specifico volume di dovrà cercare di avere una riflessione dei suoni tale da avere un ascolto confortevole: una sala conferenze dove parla un solo oratore avrà un tempo di riverberazione diverso, più lungo, rispetto ad una sala ristorante dove molte voci si sovrappongono in diverse conversazioni.
La possibilità di un buon ascolto è importante, poiché un ambiente disturbato da riverberi non solo compromette il corretto ascolto ma sottopone gli ascoltatori ad un notevole stress. Una buona qualità di ascolto, ad esempio, è legata ad una migliore resa nell'apprendimento degli studenti.

Questa considerazione sta alla basa di alcuni obblighi normativi contenuti nel DM del 18/12/1975 *"Norme tecniche aggiornate relative all'edilizia scolastica, ivi compresi gli indici minimi di funzionalità didattica, edilizia ed urbanistica da osservarsi nella esecuzione di opere di edilizia scolastica"* che impongono la verifica dei tempi di riverberazione per le aule scolastiche e le palestre e l'allineamento di questi tempi a dei valori ottimali riportati nella norma.

Calcolo previsionale dei requisiti acustici passivi negli edifici

Il progettista che si trova a dover definire una struttura in funzione dell'isolamento acustico, ha a disposizione una completa serie di normative che lo supportano in questo compito.
La norma UNI 11367:2010 *Acustica in Edilizia -"Classificazione acustica delle unità immobiliari Procedura di valutazione e verifica in opera"*, definisce degli indicatori per indicare la qualità acustica di un ambiente.
Questa norma definisce, in riferimento ad alcuni requisiti acustici prestazionali degli edifici, i criteri per la loro misurazione e valutazione.
Su tale base la norma stabilisce inoltre una classificazione acustica (in riferimento ad ognuno dei requisiti), per l'intera unità immobiliare.
Viene infine proposta una valutazione sintetica (con un unico indice descrittore) dell'insieme dei requisiti per unità immobiliare. I criteri stabiliti nella UNI 11367:2010 sono applicabili a tutte le unità immobiliari con destinazione d'uso diversa da quella agricola, artigianale e industriale.
Altri strumenti normativi estremamente importanti sono le norme della serie UNI EN 12354 che trattano di *"Acustica in edilizia - Valutazioni delle prestazioni acustiche di edifici a partire dalle prestazioni di prodotti"*
Queste norme sono divise secondo i seguenti argomenti:

- Parte 1: Isolamento dal rumore per via aerea tra ambienti;
- Parte 2: Isolamento acustico al calpestio tra ambienti;
- Parte 3: Isolamento acustico contro il rumore proveniente dall'esterno per via aerea;
- Parte 4: Trasmissione del rumore interno all'esterno;
- Parte 5: Livelli sonori dovuti agli impianti tecnici;
- Parte 6: Assorbimento acustico in ambienti chiusi.

Dato che queste norme, come spesso accade, sono elaborate dai paesi del Nord Europa e quindi sono modellate su tipologie costruttive molto diverse da quelle italiane, l'UNI nel 2005 ha pubblicato un Rapporto tecnico, UNI TR 11175, che funge da "adattatore" della norma europea alla tipologia della costruzione nazionale, come esplicitamente descrive il titolo: *"Acustica in edilizia. Guida alle norme serie UNI EN 12354 per la previsione delle prestazioni acustiche degli edifici. Applicazione alla tipologia costruttiva nazionale"*.
Questa norma fornisce una metodologia per il calcolo previsionale dei requisiti acustici passivi negli edifici. A livello scientifico si può affermare che dal punto di vista acustico le norme rappresentano lo stato dell'arte in materia, quale modello di calcolo, per stimare il comportamento acustico passivo delle strutture edilizie.

Si riportano qui di seguito le principali formulazioni matematiche utilizzate nei calcoli:
Calcolo dell'indice del potere fonoisolante apparente "R'W

$$R' = -10 \log\left(10^{\frac{-R_{Dd,w}}{10}} + \sum_{F=f=1}^{n} 10^{\frac{-R_{Ff,w}}{10}} + \sum_{f=1}^{n} 10^{\frac{-R_{Df,w}}{10}} + \sum_{F=1}^{n} 10^{\frac{-R_{Fd,w}}{10}}\right)(dB) \quad [4.4]$$

Questa formula va utilizzata per stimare l'isolamento acustico ai rumori aerei offerto dalle partizioni verticali e orizzontali che dividono diverse unità immobiliari;

Calcolo del indice di valutazione dell'isolamento acustico di facciata:

$$D_{2m,nT,W} = R'_W + \Delta L_{fs} + 10 \log\left(\frac{V}{6T_0 S}\right)(dB) \quad [4.5]$$

Questa formula va utilizzata per stimare l'isolamento acustico ai rumori aerei offerto dalle strutture che costituiscono la facciata dell'edificio considerato e si applica a porzioni di facciata viste dall'interno dell'ambiente considerato;

Calcolo dell'indice del livello di rumore di calpestio normalizzato di solai:

$$L'_{n,W} = L_{n,W,eq} - \Delta L_W + K(dB) \quad [4.6]$$

Questa formula si applica per stimare la prestazione del solaio a non trasmettere i rumori impattivi, nel modello semplificato si applica a partizioni orizzontali che separano l'unità considerata da altre unità aventi ambienti sottostanti.

Le pareti verticali opache - sistemi costruttivi ed isolamento acustico
In un edificio in legno le pareti esterne sono comunemente costituite da:
1. struttura portante costituita da telaio di legno,
   - esternamente chiuso con tavolato in legno oppure pannello strutturale in OSB o multistrato;
   - placcato all'interno con pannello strutturale in OSB o multistrato;
   - riempita da materiale isolante termico fibroso, in fiocchi o granulare:
   - sul lato esterno rivestita da cappotto termico intonacato;
   - sul lato interno completata da pannello in cartongesso o fibrogesso con intercapedine vuota o riempita da materiale isolante termico fibroso, in fiocchi o granulare.
2. struttura portante costituita da pannello X-Lam
   - sul lato esterno rivestita da cappotto termico intonacato;
   - sul lato interno completata da pannello in cartongesso o fibrogesso con intercapedine vuota o riempita da materiale isolante termico fibroso, in fiocchi o granulare.

Queste due tipologie sono alternative l'una all'altra e normalmente non si trovano a coesistere nello stesso edificio.

Le partizioni all'interno di un edificio in legno sono normalmente costituite da:
1. parete costituita da orditura metallica placcata da due lastre di cartongesso o fibrogesso con intercapedine vuota o riempita da materiale isolante termico fibroso, in fiocchi o granulare;

2. parete costituita da elemento strutturale in legno (X-Lam) rivestito su una o due facce da pannello in cartongesso o fibrogesso con intercapedine vuota o riempita da materiale isolante termico fibroso, in fiocchi o granulare.

Queste due tipologie possono coesistere sullo stesso edificio dove la soluzione (1) rappresenta la normale parete divisoria mentre nella soluzione (2) coincidono la parete divisoria con l'elemento strutturale.

Come già detto in precedenza questo tipo di costruzioni, pur non essendo caratterizzate da masse importanti come possono essere quelle che si riscontrano nelle costruzioni in muratura o in cemento armato, danno ottimi risultati nel fono isolamento.
Analizzando ogni tipologia di struttura si può osservare quanto segue:

nella parete perimetrale esterna delle strutture a telaio abbiamo, procedendo dall'esterno verso l'interno, un primo potenziale sistema isolante che è costituito dal cappotto termico. Perché questo strato assolva la funzione di protezione acustica è necessario che il pannello di isolante termico che sarà impiegato, sia di materiale resiliente e poroso, quindi fonoassorbente, come, per esempio, esempio la fibra di legno o la lana di roccia.
In questo modo la combinazione della massa dell'intonaco esterno applicata sul materiale resiliente (coibente termico fibroso) determinerà un sistema dissipativo dell'onda acustica del tipo massa - molla - massa. Questa potenzialità sara però vanificata nel caso si usasse un materiale cellulare nel quale la resilienza e il fonoassorbimento sono minime.
Sul lato interno del telaio si trova il placcaggio strutturale in OSB o multistrato che, vincolato perimetralmente, funzionerà come pannello vibrante, contribuendo a dissipare la parte residua dell'onda sonora. Il riempimento dell'intercapedine all'interno del telaio, normalmente realizzato con materiale fibroso, che contribuirà ulteriormente all'ottenimento di un ulteriore abbattimento del rumore. Si riporta di seguito il disegno schematico della parete e un grafico che mostra il variare del coefficiente di assorbimento acustico apparente "α" al variare delle frequenze per i diversi meccanismi di assorbimento acustico.

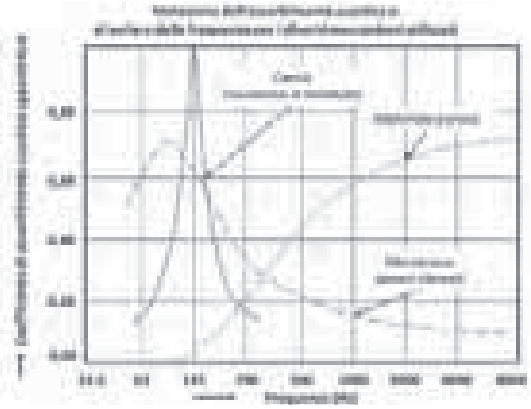


Figura 4.17_Schema costruttivo e variazione assorbimento acustico.

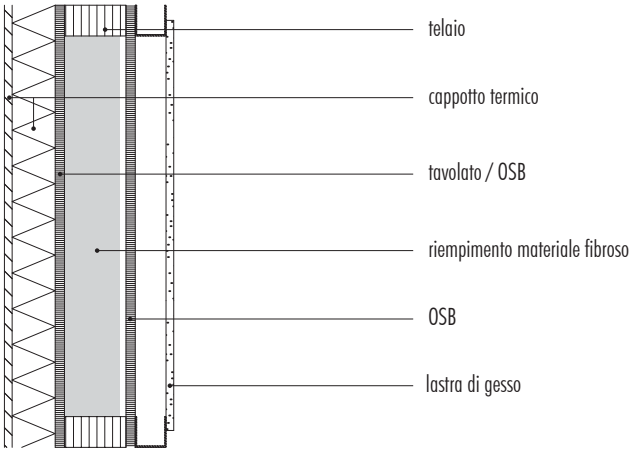


Figura 4.18_Parete esterna con struttura a telaio.

Nel caso della struttura a pannelli al primo presidio rappresentato dal cappotto termico esterno, si associa un elemento di massa importante, il pannello X-Lam, che contribuisce a sua volta al fonoisolamento.
In entrambi i casi la parete interna sarà placcata da una lastra di cartongesso o fibrogesso montata su struttura metallica. Anche in questo caso si può ipotizzare un comportamento fonoassorbente come quello descritto in precedenza. È importante sottolineare che se nel sistema a pannello vibrante il meccanismo dissipativo si gioca sul comportamento viscoso del materiale costituente il pannello nella zona in prossimità dei vincoli e come massa accoppiata ad una molla (cuscino d'aria nell'intercapedine) nella zona di massima oscillazione distante dai vincoli. Alla luce di queste considerazioni diventa fondamentale porre molta attenzione a due aspetti:

- rispettare le regole di fissaggio dei pannelli, normalmente fornite dai produttori;
- nel caso si operi un riempimento della cavità ottenuta tra la struttura che porta il pannello ed il pannello stesso, questo riempimento dovrà essere fatto con materiale flessibile e non dovrà essere compresso, in modo da non formare ponti acustici in corrispondenza di eventuali riduzioni del lume dell'intercapedine (impianti, scatole di derivazione ecc..)

Da quanto su detto è evidente che mentre dal punto di vista termico si può parlare di "Materiali isolanti termici" e su questi all'interno di un elemento costruttivo grava la maggior percentuale di isolamento offerta dall'elemento stesso, in acustica si deve parlare di sistemi isolanti acustici in quanto tutti gli strati che costituiscono l'elemento hanno un ruolo fondamentale e devono essere messi in opera con estrema attenzione e perizia.

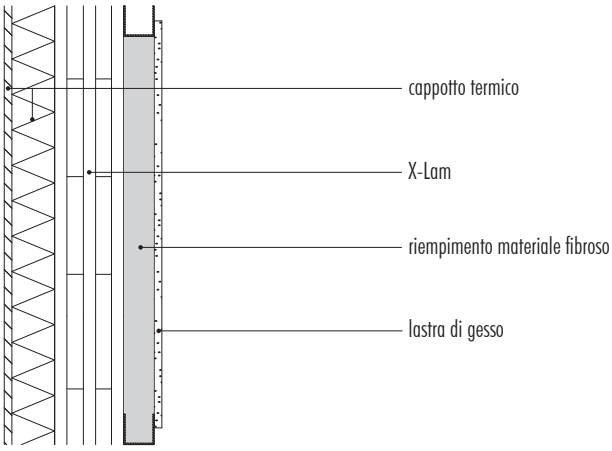


Figura 4.19_Parete esterna con struttura a pannello.

Per le pareti interne i principi fondamentali sono quelli illustrati, ovvero l'utilizzo di cartongesso o fibrogesso e riempimenti flessibili non pressati.

Nella figura riportata qui sotto è schematizzata una partizione interna formata da pannelli in cartongesso o fibrogesso con interposto del materiale fonoassorbente realizzato in fibre di legno. Per migliorare il potere fonoisolante di questo sistema isolante acustico, bisognerebbe che fra i profilati metallici a "C" di supporto ai panelli, e la struttura a cui essi sono fissati, sia interposto uno strato di materiale resiliente. Questo accorgimento tecnico consentirebbe di smorzare ulteriormente la trasmissione indiretta per via strutturale.

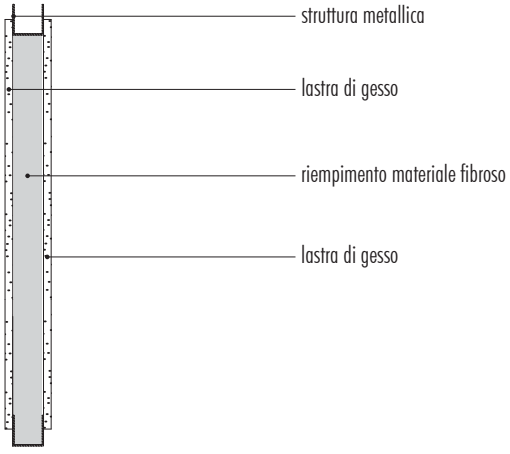


Figura 4.20_Parete divisoria interna.

In casi particolari, dove si vogliono ottenere livelli di isolamento elevati, potrà essere utile realizzare pareti con doppia lastra di gesso oppure con doppia orditura. In

quest'ultima ipotesi si dovrà prestare attenzione affinché le due orditure metalliche non entrino in contatto in alcun punto per evitare la formazione di ponti acustici che vanificherebbero il risultato finale.

Nelle tre figure riportate qui sotto sono schematizzate tre differenti soluzioni per la realizzazione delle partizioni interne più o meno prestanti dal punto di vista dell'isolamento acustico a seconda delle prestazioni necessarie. Come si può osservare è possibile installare due panelli di cartongesso per parte aumentando notevolmente la massa superficiale del divisorio e di conseguenza il potere fonoisolante.

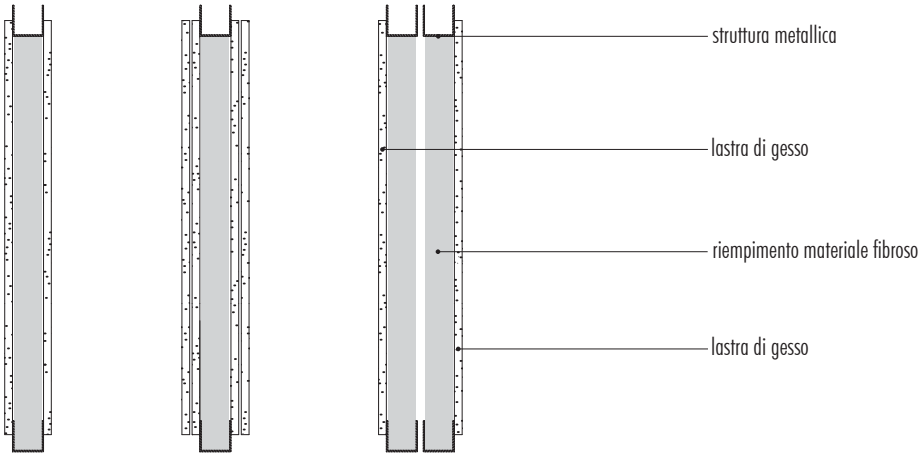


Figura 4.21_differenti soluzioni per pareti divisorie interne.

Altra soluzione (ultima figura a destra) consiste come su descritto nel montare due supporti metallici indipendenti avendo cura che questi siano ancorati con interposto uno strato resiliente.

Il metodo più utilizzato per ottenere un buon isolamento acustico dei solai è quello del "massetto galleggiante", ovvero la formazione di una "vasca" in materiale resiliente, che ospita il massetto e il sovrastante pavimento. In questo modo si ottiene una separazione totale della pavimentazione dal resto della struttura.

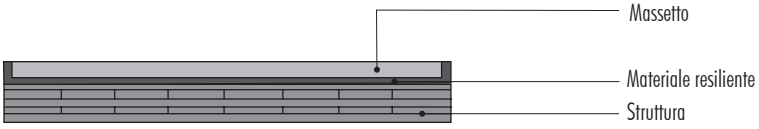


Figura 4.22_Massetto galleggiante.

I materiali resilienti possono essere di vari tipi.
Vista la natura delle costruzioni che si affrontano in questo volume citiamo, come esempi, i pannelli in fibra di legno da sottopavimento. Si riporta di seguito un grafico che mostra come varia la pressione sonora, rispetto alla frequenza, quando nel solaio è presente uno strato di materiale resiliente.

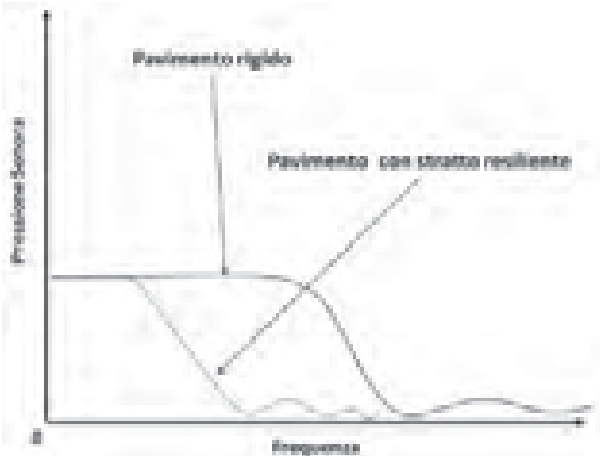


Figura 4.23_Andamento della pressione sonora rispetto alla frequenza nel caso di materiali rigidi e materiali resilienti posti sotto il pavimento.

Dal grafico è evidente come la presenza di uno strato di materiale resiliente porti ad avere una riduzione della trasmissione del fenomeno sonoro in un ampio intervallo di frequenze.

4.5 • CRITERI E FINALITÀ GENERALI DELLA PROGETTAZIONE IMPIANTISTICA

In un contesto progettuale caratterizzato da notevoli livelli di eccellenza nella totalità dei comparti costruttivi legati all'edificazione in legno, la progettazione degli impianti ricopre un ruolo cruciale nella sfida dell'efficienza. Questa, risultando dal rapporto fra beneficio ottenuto ed energia spesa per ottenerlo, può essere massimizzata unicamente attraverso tecniche, o ove possibile tecnologie, che riducano il consumo di risorse, o secondariamente, la "spesa" per il loro sfruttamento. Sulla base di ciò, risulta quindi raccomandabile che la finalità ed il criterio della progettazione degli impianti in edifici efficienti in legno sia proprio…. l'efficienza. Tale finalità, o criterio, non va comunque perseguita a qualunque costo: spesso infatti surplus marginali di rendimento vengono conquistati pagando un prezzo eccessivo in termini di costo d'installazione e complicazione impiantistica. Il ruolo del progettista accorto è quello, quindi, di individuare questo limite che costituisce il punto d'incontro, che può definirsi ottimale, fra resa (elevata) e semplicità (massima).

Le fonti rinnovabili possono fornire un importante contributo al perseguimento degli obiettivi detti, per la loro disponibilità, per il loro, talvolta, trascurabile costo e per la semplicità impiantistica necessaria al loro sfruttamento efficiente. E' evidente che solo alcune delle fonti energetiche definite rinnovabili (nelle più comuni e diffuse definizioni) risultano ragionevolmente sfruttabili nel settore residenziale. Infatti solo l'energia solare, l'energia eolica, la fonte geotermica e l'energia da biomassa possono essere sensatamente sfruttate nell'ambito abitativo allo scopo, come già detto, di perseguire resa e semplicità dell'impianto.
Un ulteriore fonte, anch'essa rinnovabile, svolge un ruolo fondamentale nella sfida dell'efficienza: la riduzione dei consumi. Le fonti rinnovabili non sono quasi mai abbondanti, ed il loro sfruttamento risulta impegnativo sia per ragioni di costo che di spazio disponibile. L'energia solare, per esempio, è una fonte ampiamente disponibile (quasi 1000 W/m^2), ma il cui sfruttamento richiede quasi sempre ampie superfici di captazione. Ciò costituisce un problema nel settore residenziale. Nell'applicazione delle fonti rinnovabili in ambito residenziale il primo provvedimento da assumere, quindi, è l'analisi dei consumi energetici e la loro riduzione.
Dovranno cioè essere presi tutti quei provvedimenti tali che il costo dell'energia risparmiata sia inferiore a quello dell'energia prodotta con la fonte rinnovabile. Oltre ai classici interventi atti al contenimento dei consumi (che risultano ormai ampiamente normati) prima della progettazione di impianti e sistemi energetici all'interno di edifici ad elevata efficienza, quali vogliono essere le costruzioni in legno, si dovrebbe tenere in considerazione il costo dell'unità di energia prodotta attraverso la fonte rinnovabile e confrontarlo col costo che avrebbe un intervento di miglioramento energetico che consenta il risparmio della medesima unità di energia. La Tabella 4.17 mostra un elenco, non esaustivo, degli interventi di risparmio o efficienza energetica che il progettista deve prendere in considerazione nelle fasi preliminari di progettazione di sistemi integrati che utilizzano fonti

rinnovabili.

Esempio 1: Un sistema di illuminazione esterna di tipo tradizionale (lampade alogene) di potenza complessiva 860 W consuma annualmente 2.5 MWh. Si vuole soddisfare il 50 % del fabbisogno energetico annuo con un impianto fotovoltaico. L'impianto fotovoltaico dovrà produrre, quindi, 1250 kWh/anno. Poiché l'impianto verrà installato ad una latitudine (38° Nord) in cui la producibilità da fonte fotovoltaica è di 1250kWh/kW$_p$, questo dovrà avere una potenza di 1 kW$_p$ ed occuperà una superficie in pianta di 7 m^2. Il suo costo sarà di 6230 €. In alternativa si decide di sostituire i corpi alogeni con lampade a floruescenza in maniera tale da avere lo stesso valore di illuminamento medio (potenza complessiva 180 W). Il costo di tale intervento sarà di 85 € ed il consumo annuo risulterà di 525 kWh (circa un quinto del precedente impianto di illuminazione). L'impianto fotovoltaico che soddisfa il 50% del fabbisogno energetico annuo di questa nuova configurazione avrà una potenza di picco di 420 Wp ed un costo di 2780 €.

Se si analizzano i risultati dell'esempio riportato sopra si può vedere come la spesa complessiva sostenuta per l'approntamento della seconda soluzione sarà complessivamente di 2865 €, ovvero consentirà un risparmio in fase di installazione di 3365 €. La seconda soluzione però avrà benefici anche in fase di esercizio. Il restante 50% di energia elettrica che sarà necessario acquistare costerà 225 €/anno nella prima soluzione, mentre solo 95 € nella seconda, consentendo il conseguimento di un ulteriore risparmio di 130 €/anno.
Esempi come quello illustrato mettono in evidenza come sia di cruciale importanza, prima della progettazione di un sistema che prevede l'utilizzo di fonti rinnovabili, analizzare i consumi e, ove possibile, intervenire per una loro riduzione: il beneficio sarà sia energetico/ambientale che economico.

FONTE RINNOVABILE		
Fotovoltaico	Solare termico (Risc + ACS)	Geotermico (PdC raffr)
Interventi preliminari		
Sfruttamento dell'illuminazione naturale	Riduzione dei consumi di ACS (p.e. valutando la reale necessità del ricircolo)	Orientamento dell'edificio
Incremento dell'efficienza dei sistemi di illuminazione	Isolamento termico	Ombreggiamento
Applicazione di INVERTER sui motori (p.e. autoclavi)	Eliminazione dei ponti termici	Freecooling
	Generazione efficiente dell'energia termica	Ventilazione notturna
	Utilizzo di chiusure trasparenti LE	Ventilazione con recupero
	Utilizzo di terminali a bassa temperatura	

Tabella 4.19_Intervento di risparmio energetico da valutare prima di installare la relativa fonte energetica rinnovabile

4.5.1 Un criterio per il dimensionamento della fonte rinnovabile

Il dimensionamento "classico" delle centrale termica o frigorifera viene usualmente eseguito utilizzando rispettivamente la UNI 12831 [1] e il metodo Carrier [2]. Ambedue i codici di calcolo, consentono la determinazione della potenza di picco necessaria per abbattere il carico. Quindi, essendo metodi di calcolo "stazionari", conducono al dimensionamento per la copertura del carico massimo. Tale pratica, ormai ampiamente consolidata, assicura la copertura in tutte le condizioni di esercizio ma non consente una buona prestazione energetica[1]. Inoltre questo metodo di calcolo non permette ne di massimizzare i valori di REP (Rapporto Energia Primaria) per la tipologia di generatore scelto ne di ottenere risparmi significati sia in fase di esercizio che di installazione.
Risulta evidente che, il nuovo parametro guida per il dimensionamento dei sistemi che utilizzano, totalmente o in parte, fonti energetiche rinnovabili debba essere l'energia e non la potenza (di picco). Come già avviene per gli impianti di generazione alimentati da energia solare (fotovoltaici o termici[2]), la scelta della potenza da installare deve essere fatta con l'obiettivo di ottenere una produzione di energia su base annuale coincidente con la frazione dei consumi che si vuole coprire (valore di integrazione obiettivo).
Questa "nuova" procedura di dimensionamento richiede il calcolo dinamico del carico termico. La variabilità del carico termico o frigorifero richiesto alla centrale termica/frigorifera può essere, quindi, evidenziato su un particolare tipo di grafico, detto curva di durata, che fornisce utili informazioni per un corretto dimensionamento del sistema. La curva di durata (il termine deriva dalla curva che descrive la disponibilità di una fonte energetica, solitamente vento o acqua) viene costruita ordinando tutti i carichi orari dell'anno in ordine decrescente. Chiaramente, l'area sottesa alla curva è proporzionale all'energia annua richiesta. La Figura 4.24 mostra la curva di durata dei carichi termici invernali ottenuta per un edificio residenziale in zona climatica D. La lettura del grafico risulta abbastanza intuitiva. I valori limite della curva, 12 kW e 1980 ore indicano rispettivamente la potenza di picco richiesta all'impianto di riscaldamento e le ore di funzionamento dell'impianto in una stagione (12 h/giorno x 165 gg/stagione).

Un punto qualunque A, di coordinate $[x_A;y_A]$, scelto sulla curva, sta ad indicare che il carico termico sarà superiore a y_A per x_A ore nell'intera stagione. Con riferimento alla curva di Figura 4.24 risulta che il carico termico è superiore a 6 kW (50%

1_Basti pensare alle caldaie murali per il riscaldamento domestico. Edifici in legno, con livelli di coibentazioni come quelli proposti nei capitoli precedenti, consentono notevoli prestazioni in termini di contenimento delle dispersioni termiche. Da ciò deriva che unità abitative anche grandi hanno carichi termici base dell'ordine dei 6-7 kW con un carico di picco di 12-14 kW. L'installazione di generatori modulanti ad elevata efficienza con potenza nominale di 20 - 24 kW (necessari per la produzione istantanea di acqua calda sanitaria) implica il funzionamento sotto il limite inferiore di parzializzazione (30 %) per buona parte della stagione. In tali condizioni una caldaia modulante sarà costretta a continui cicli ON/OFF che ne compromettono l'efficienza complessiva.

2_Negli impianti solari fotovoltaici, la dimensione del campo solare viene stabilita, solitamente, uguagliando il fabbisogno annuale di energia dell'utenza con la producibilità del sistema fotovoltaico. Analogamente nel dimensionamento di un impianto solare per la produzione di acqua calda sanitaria, l'obiettivo è la copertura del 50% del fabbisogno energetico necessario. In ambedue i casi la potenza di picco richiesta dall'utenza non viene presa in considerazione e se ne demanda l'eventuale copertura a sistemi di back-up (rispettivamente la rete elettrica e la caldaia ausiliaria).

del carico di picco) per 230 ore/stagione (11% della durata dell'intera stagione).

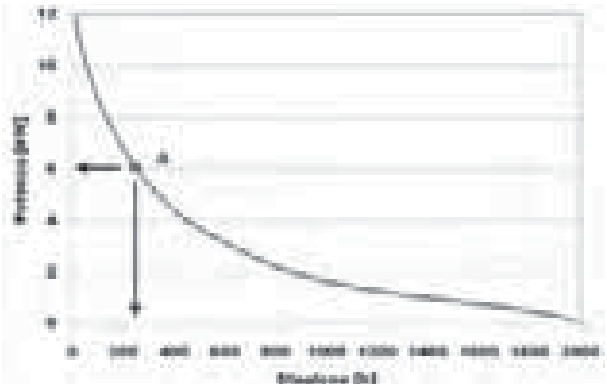


Figura 4.24_Curva di durata per un'unità abitativa in zona climatica D (165 gg. di riscaldamento 12h/giorno).

In una condizione come quella descritta dalla figura sopra risulta certamente più economico dimensionare la centrale termica con fonte rinnovabile per la copertura della metà del carico di picco e lasciare che sia un sistema ausiliario a generare il calore nelle poche ore restanti: non bisogna dimenticare infatti che la realizzazione di una centrale termica (analogo discorso vale per centrali frigorifere) a fonte rinnovabile comporta un costa di installazione maggiore a quello delle tecnologie convenzionali e che tale costo risulta essere proporzionale alla potenza installata. Un dimensionamento eseguito secondo il criterio illustrato porta due immediati benefici:

- il costo dell'installazione risulta minore con tempi di ritorno dell'investimento più vicini alle aspettative della committenza.
- la generazione del calore risulta più efficiente poiché i due generatori installati funzionano per più ore all'anno in condizioni di carico prossime alla potenza nominale.

Risulta quindi più economico ed efficiente sottodimensionare il sistema di generazione a fonte rinnovabile ed affiancare a questo un generatore di tipo tradizionale. Il rapporto fra i valori di potenza nominale dei due generatori installati dovrà essere valutato dal progettista sulla base dell'analisi dinamica del carico e dello studio della curva di durata, secondo le modalità già illustrate. Chiaramente una soluzione mista come quella proposta comporterà costi di esercizio leggermente superiori rispetto ad una soluzione *full renewable* ma il beneficio in termini di costo ridotto dell'investimento iniziale risulteranno superiori all'extra costo d'esercizio dovuto al funzionamento in tandem della tecnologia rinnovabile e di quella tradizionale[3].

3_A titolo di esempio si immagini un sistema di riscaldamento con pompa di calore elettrica assistito da fonte solare o geotermica. Il sottodimensionamento del campo solare termico o della sonda geotermica comporta un risparmio, dovuto al minor numero di pannelli solari o sonde geotermiche installate, notevolmente maggiore al costo di acquisto ed installazione di una caldaia per integrare la minore energia solare o geotermica estratta.

In conclusione si può dire che nel caso di progettazione di impianti energetici a fonti rinnovabili è opportuno utilizzare codici di calcolo basati sull'analisi dinamica dei carichi (ottenuti con opportuni software [3]) e procedere allo studio critico della curva di durata. Solo con l'utilizzo di questi strumenti è possibile trovare il punto di incontro ottimale fra efficienza e convenienza economica.

4.6 • TECNOLOGIE IMPIANTISTICHE APPLICABILI.

Fra le tecnologie innovative applicabili di sicuro interesse è il "*solar cooling*" ovvero la possibilità di climatizzare l'ambiente residenziale utilizzando in buona parte l'energia termica solare.
Il consumo energetico del settore domestico e terziario rappresenta circa il 40% del totale degli usi finali di energia nell'Europa a 15 Paesi. All'interno di tali consumi, la quota dovuta alla climatizzazione degli ambienti è aumentata, negli ultimi decenni, drammaticamente nei paesi mediterranei ma anche significativamente in quelli del centro-nord Europa.
Le motivazioni principali dell'incremento della domanda energetica per la climatizzazione estiva risiedono nell'aumentato livello della qualità della vita e nella conseguente necessità di migliorare il comfort negli ambienti di lavoro e nelle abitazioni, oltre che nell'impiego nelle moderne architetture di vaste superfici vetrate, che provocano incrementi notevoli nei carichi termici estivi [4].

Ciò ha comportato delle conseguenze rilevanti sull'andamento del profilo dei carichi sulla rete elettrica, specialmente nel periodo estivo.
La domanda di energia per il condizionamento degli ambienti è aumentata considerevolmente ed il trend è ancora fortemente in crescita. Le tecnologie tradizionalmente utilizzate per il condizionamento sono causa di notevoli sovraccarichi della rete elettrica di distribuzione con conseguente rischio di black-out elettrici. In particolare il rischio è di dover aumentare significativamente la potenza installata senza un corrispondente aumento del consumo con il risultato di un costo dell'energia più alto.
Attualmente, nei paesi del sud Europa, c'e una precisa correlazione fra l'incremento del picco del carico sulla rete elettrica nel periodo estivo e l'incremento delle vendite di climatizzatori di taglia media e piccola il cui mercato è esclusivamente appannaggio dei tradizionali sistemi a compressione di fluidi azionati da motori elettrici.
Poiché il profilo giornaliero della domanda di climatizzazione ambienti quasi si sovrappone a quello dell'energia fornita da un sistema solare termico (Figura 4.25), sistemi di climatizzazione solare o assistiti dal solare possono costituire una valida alternativa ai climatizzatori tradizionali. Infatti, l'energia solare costituirebbe, in tutto o in parte, la sorgente energetica primaria per l'azionamento di climatizzatori ad assorbimento/adsorbimento che, come noto, sono delle macchine termiche [5].
Le macchine ad assorbimento di vapore d'acqua su solidi porosi (es. zeoliti, gel di silice) risultano particolarmente indicate per la specifica applicazione del solar cooling.

Difatti, oltre alla silenziosità ed all'impiego di materiali rispettosi dell'ambiente, le macchine ad adsorbimento presentano prestazioni attraenti per i bassi livelli di temperatura tipici delle applicazioni che prevedono l'uso di energia solare. Inoltre, possono essere configurate modularmente ed in taglie ridotte, adattandosi ad un impiego flessibile nel settore residenziale.

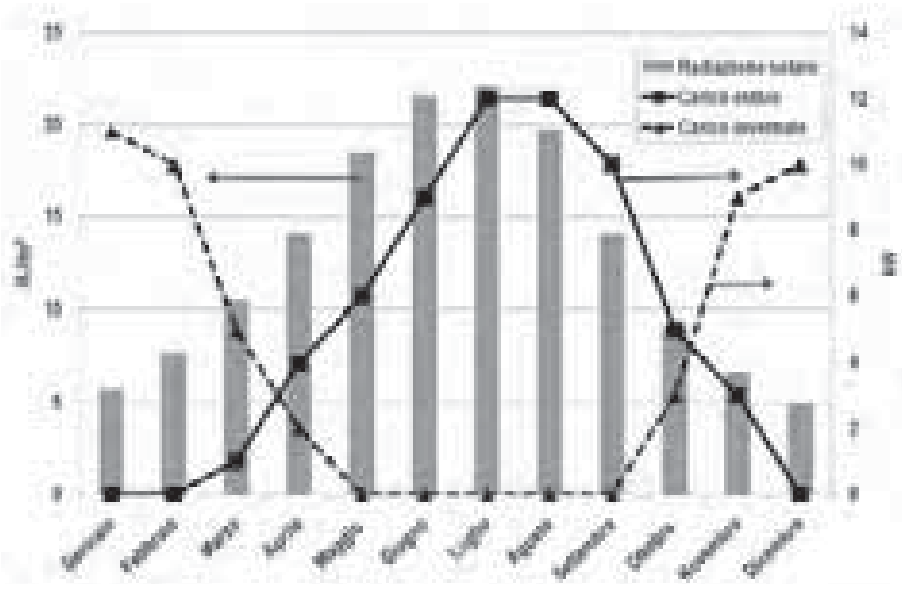


Figura 4.25_Andamento dei carichi invernali ed estivi e della radiazione solare incidente (38° Lat. N).

Il diffondersi di questa tipologia di sistemi di climatizzazione porterebbe ad una sostanziale riduzione dei picchi di carico estivo sulla rete elettrica e ad un beneficio ambientale connesso all'utilizzo dell'energia solare in sostituzione dell'elettricità. Tale beneficio sarà tanto maggiore per quei paesi, come l'Italia, in cui la produzione di elettricità avviene quasi esclusivamente a partire da combustibili fossili.
Oltre ai benefici ambientali ed energetici appena illustrati bisogna tenerne in considerazione alme altri due: uno economico ed uno tecnico. Il beneficio economico è essenzialmente connesso al fatto che parte (o tutta) l'energia necessaria al funzionamento del climatizzatore è gratuita e quindi i costi di esercizio sono ridotti. Il vantaggio tecnico consiste essenzialmente nella possibilità di sfruttare l'impianto solare, eventualmente dimensionato per l'integrazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria, anche in estate evitano rischiosi innalzamenti della temperatura nel sistema solare e/o lo spreco di notevoli quantità di energia termica[4].

4.6.1 Case study: solar-cooling di piccola taglia in clima mediterraneo

La realizzazione di un impianto per solar cooling di taglia piccola (o piccolissima, 3-8 kW) presenta diverse criticità. Prima fra queste la reperibilità sul mercato di macchine frigorifere ad adsorbimento/assorbimento thermally driven di taglia adeguata alla piccola climatizzazione. La Tabella 4.18 mostra un elenco di refrigeratori per il solar cooling di piccola taglia attualmente sul mercato. Come risulta evidente solamente un paio hanno potenza inferiore agli 8 kW. Seconda

4_In caso di ridotto sfruttamento del calore prodotto i dispositivi di sicurezza degli impianti solari evacuano l'eccesso di calore (sotto forma di vapore o acqua calda) in ambiente consentendo il contemporaneo reintegro con acqua fredda. Ciò costituisce una "inefficienza energetica" ed uno stress termo-meccanico per i componenti dell'impianto.

criticità per sistemi di così ridotta taglia è il dimensionamento dei componenti (specialmente il capo solare): in sistemi di potenzialità contenuta eventuali errori progettuali possono compromettere il funzionamento dell'impianto in maniera vistosa. Allo stato attuale non esistono norme o codici di calcolo di riferimento per il dimensionamento degli impianti solar cooling[5] [7].

Produttore	Yazaki Giappone	EAW Germania	Sonnenklima Germania	Rotartica Spagna	Climatewell Svezia	SolarNext Germania	SorTech Germania	SorTech Germania	SJTU Germania	InvenSor Germania
Modello	WFC-SC5 chillii®WFC18	Wegracal SE15	Suninverse 10	Solar 045	Climatewell 10	chillii®PSC12	ACS 08 chillii®ST08	ACS 15 chillii®ST15	SWAC 10	HTC 10 chillii®SC10
Tecnologia	Assorbimento	Assorbimento	Assorbimento	Assorbimento	Assorbimento	Assorbimento	Assorbimento	Assorbimento	Assorbimento	Assorbimento
Potenza frigorifera [kW]	17,5	15	10	4,5	10	12	7,5	15	10	10
Temperatura acqua calda [°C]	88/83	90/80	75/65	90/85	83/-	85/78	75/68	75/69	85/79	95/87
Temperatura di re-cooling [°C]	31/35	30/35	27/35	30/35	30/-	24/29	27/32	27/32	30/36	32/38
Temperatura acqua fredda [°C]	12,5/7	17/11	18/15	13/10	-/15	12/6	18/15	18/15	15/10	18/15
COP	0,7	0,71	0,77	0,67	0,68	0,62	0,56	0,56	0,39	0,5
Dimensioni (LxDxH) (m x m x m)	0,60 x 0,8 x 1,77	1,75 x 0,76 x 1,75	1,13 x 0,80 x 1,96	1,09 x 0,76 x 1,15	1,20 x 0,80 x 1,6	0,80 x 0,60 x 2,2	0,79 x 1,06 x 0,94	0,79 x 1,35 x 1,45	1,80 x 1,20 x 1,4	0,65 x 1,30 x 1,65
Peso [Kg]	420	660	550	290	875	350	260	510	1600	370

Tabella 4.20_Macchine frigorifere di piccola taglia per il solar cooling (fonte dr. Uli Yakob, SolarNext, 2008)

Di seguito si presenta un impianto solar cooling per la climatizzazione di un ufficio realizzato presso il CNT-ITAE[6]. I risultati del dimensionamento possono esser applicati per la progettazioni di sistemi di taglia ridotta ma di potenzialità diversa. Lo schema esecutivo della centrale frigorifera solare del sistema realizzato è mostrato in Figura 4.26. Nell'immagine sono facilmente individuabili i componenti principali insieme a tutti i dispositivi di sicurezza e gli accessori per la gestione e il controllo.

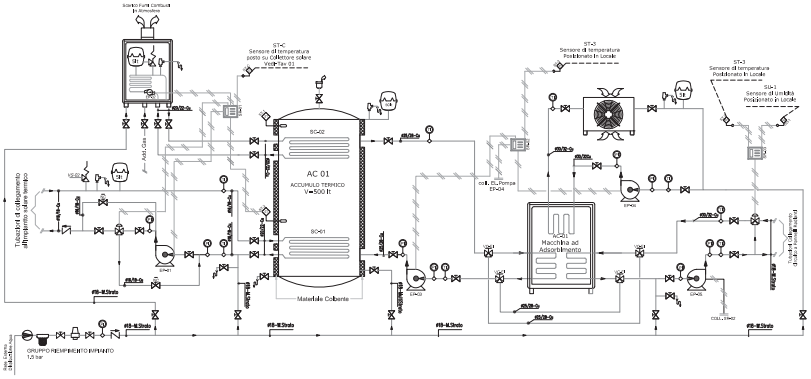


Figura 4.26_Schema funzionale "base" di un impianto solar cooling di piccola taglia.

5_Per la valutazione delle prestazioni dei chiller ad adsorbimento, in relazione alla loro interazione energetica con il sistema di generazione solare, si può fare riferimento alle figure di merito riportate in UNI 11300-4. Per la valutazione delle prestazioni in esercizio si potrà fare riferimento (quando pubblicati) ai risultati dell'attività del Task 38 del Solar Hating & Cooling Programme della IEA.

6_Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), Istituto di Tecnologie Avanzate per l'Energia "Nicola Giordano" (ITAE), Via Salita S. Lucia sopra Contesse n. 5, 98126, S. Lucia, Messina, ITALY Phone: +39.090.624.200 - Fax: +39.090.624.247, web: www.itae.cnr.it, mail: itae@itae.cnr.it

Il vano/locale da climatizzare scelto per la realizzazione consiste in un piccolo container dedicato ad ufficio di cantiere le cui dimensioni complessive sono di 3,5 m (L) x 2,5 m (A) x 2,5 m (P).
In Figura 4.27 è visibile il container/ufficio allestito come "utenza" dell'impianto solar cooling realizzato. Il piccolo ufficio è situato nell'area esterna dell'Istituto ITAE.

Figura 4.27_Il modulo ufficio "utenza" dell'impianto solar cooling realizzato

Il dimensionamento dell'intero sistema è stato effettuato realizzando un modello dinamico tramite i software TRNSYS [3]. Il modello è stato quindi utilizzato per simulare il funzionamento del sistema durante l'intero periodo estivo (dal 15 giugno al 15 settembre) e calcolare le prestazioni ottenibili [8].
Al fine di prevedere la configurazione ottimale del sistema, si sono effettuate simulazioni ipotizzando l'installazione di pannelli solari sia di tipologia a tubi evacuati che quella piana. Fra le variabili del sistema sono stati inseriti anche alcuni importanti parametri: il volume dell'accumulo termico, l'angolo di inclinazione e la superficie complessiva captante dei collettori solari.
Di volta in volta si sono valutate le prestazioni complessive del sistema solar cooling calcolando due parametri di riferimento:

- la frazione solare, ovvero la quantità di energia termica fornita dai collettori solari rispetto alla quantità di energia termica totale necessaria, come riportato nella seguente formula:

$$f = \frac{Q_{sol}}{Q_{sol} + Q_{cald}}$$

dove:

f è la frazione solare (solar Energy supply);
Q_{sol} è l'energia termica fornita dai collettori solari in kJ;
Q_{cald} è l'energia termica fornita dalla caldaia di integrazione in kJ.

- Il REP (Rapporto Energia Primaria), ovvero il rapporto fra l'energia impiegata per il raffrescamento del carico rispetto al consumo di energia primaria necessario

per il funzionamento dell'impianto, quindi gas consumato per il funzionamento della caldaia e consumo (elettrico) dovuto agli ausiliari:

$$REP = \frac{Q_{fr}}{Q_{gas} + Q_{aux} / 0.37}$$

dove:

Q_{fr} è il calore asportato dal locale da raffrescare;

Q_{gas} è l'energia primaria consumata dalla caldaia;

Q_{aux} è l'energia elettrica consumata dagli ausiliari (pompe, fan coil e dry coolers);

0.37 è il rendimento di centrale utilizzato come riferimento in Italia per convertire consumo di energia elettrica in consumo di energia primaria.

Individuate le figure di merito atte a descrivere le prestazione del sistema, sono state effettuate alcune simulazioni preliminari allo scopo di determinare l'angolo di inclinazione ottimale dei collettori (azimut 0°). Si sono eseguite simulazioni ipotizzando l'installazione di collettori piani e di collettori del tipo a tubi sotto vuoto, mantenendo invariati gli altri parametri. I risultati ottenuti (Figura 4.28 e Figura 4.29) mostrano che l'angolo di inclinazione ottimale è 20° per entrambi i casi, anche se l'influenza della variazione di inclinazione è più evidente per i collettori piani: una riduzione della frazione di energia solare di circa il 25 % è apprezzabile cambiando l'angolo di inclinazione da 20 ° a 45 °, mentre per i collettori a tubi sottovuoto tale variazione è contenuta in solo il 2%.
Per il completo dimensionamento del sistema si sono condotte altre simulazioni facendo variare il volume di accumulo termico e l'area complessiva dei collettori solari.

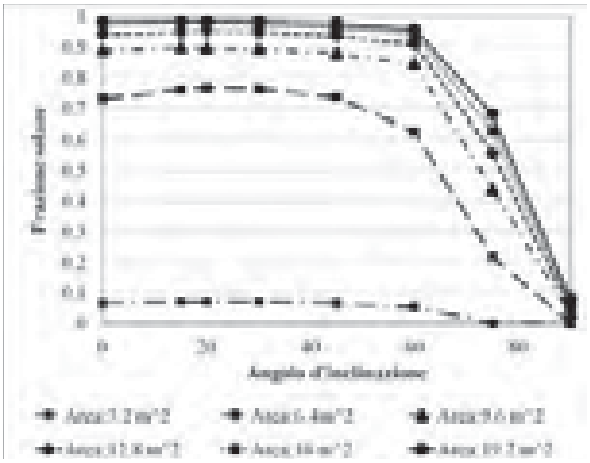


Figura 4.28_Grafico della frazione solare ottenuta al variare dell'angolo di tilt di installazione del campo solare, e della superficie netta captante (tubi sotto vuoto).

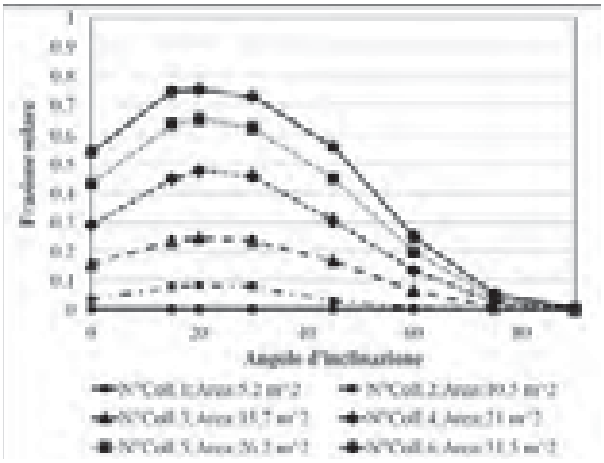


Figura 4.29_Grafico della frazione solare ottenuta al variare dell'angolo di tilt di installazione del campo solare, e della superficie netta captante (pannelli piani).

Al fine di determinare il valore massimo della superficie di collettori solari da simulare si è fatto ricorso ad una regola empirica riportata in [6]:

$$S = \frac{1}{G \cdot COP \cdot \eta}$$

dove:

S è la superficie specifica del campo di collettori in m^2/kW;
G è la radiazione media incidente durante il periodo di funzionamento dell'impianto in kW/m^2;
COP è il Coefficient Of Performance della macchina impiegata;
η è il rendimento medio dei collettori durante il periodo di funzionamento.

Considerando un valore medio di radiazione solare incidente di 700 W/m^2, un COP medio stagionale del refrigeratore ad adsorbimento di 0.45, un rendimento del campo solare a tubi sotto vuoto e a collettori piani di rispettivamente di 0.5 e 0.4, si ottiene che la superficie specifica ottimale di captazione è di 6.35 m^2 e 7.95 m^2 per ogni kW di freddo da produrre, rispettivamente per pannelli del tipo a tubi evacuati e piani.
Sulla base di questo calcolo si è scelto di effettuare simulazioni variando il volume di accumulo fra 300 e 750 l e la superficie captante complessiva dei collettori solari fino a 19.2 m^2 e 26.2 m^2 rispettivamente per pannelli evacuati e pannelli piani[7].
La Figura 4.30 e la Figura 4.31 mostrano i risultati dell'analisi parametrica. E' evidente come i collettori a tubi sottovuoto permettono di ottenere una fornitura di energia solare molto alta, pari a circa il 95% dell'energia totale richiesta, per volumi di accumulo termico compresi fra 500 e 750 l.

7_Il carico frigorifero massimo richiesto dall'utenza è di 3 kW frigoriferi (quasi 11000 BTU/h), per tanto i valori di superficie specifica riportanti in precedenza, 6.35 e 7.95 m^2/kW_f, moltiplicati per il carico restituiscono rispettivamente 19.2 e 26.2 m^2.

Al contrario, i collettori piani permettono di raggiungere un valore massimo di frazione solare pari al 65% con un accumulo termico di 750 l, mentre una notevole riduzione del valore di frazione solare può essere osservata quando il volume di accumulo termico è ridotto.
La Figura 4.32 mostra l'evoluzione oraria, nella settimana più calda dell'anno (17-23 luglio), della temperatura ambiente interna per il sistema solar cooling ottimizzato utilizzando i risultati riportati nei grafici sopra (12.8 m^2 di collettori a tubi evacuati, 20 ° di inclinazione, 500 l di accumulo). I risultati mostrano come l'impianto solar cooling sia in grado di mantenere una temperatura interna confortevole (25 ° C), anche se la temperatura esterna supera i 35 ° C.

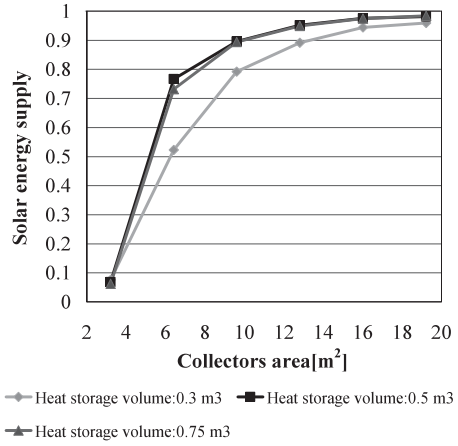


Figura 4.30_Grafico della frazione solare ottenuta al variare della superficie del campo solare e del volume dell'accumulo (tubi sotto vuoto).

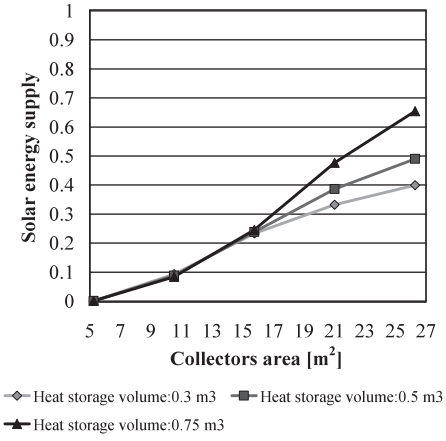


Figura 4.31_Grafico della frazione solare ottenuta al variare della superficie del campo solare e del volume dell'accumulo (pannelli piani).

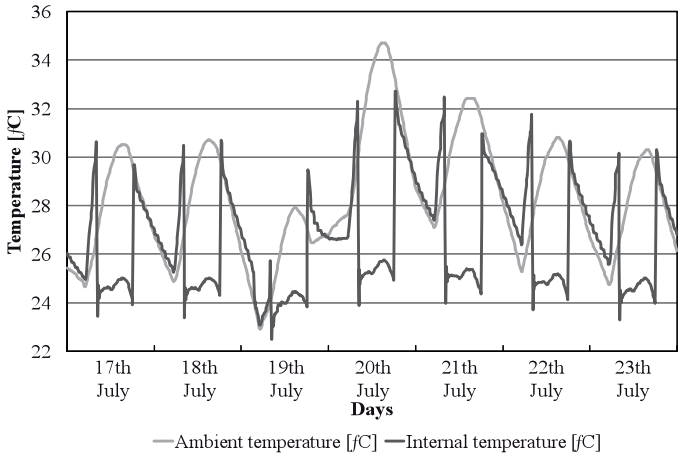


Figura 4.32_Andamento della temperatura all'interno del locale climatizzato durante la settimana più calda dell'anno.

La Figura 4.33 e la Figura 4.34 mostrano alcune immagini dell'impianto realizzato. In particolare la centrale frigorifera è stata realizza secondo lo schema di Figura 4.26: l'acqua calda prodotta dal campo solare viene accumulata in un accumulo coibentato (2 in Figura 4.34). Il volume di questo accumulo è di 500 litri, valore desunto dai risultati del codice di calcolo presentato prima . L'accumulo è collegato a una caldaia a gas (1 in Figura 4.34) che fornisce calore al sistema quando la radiazione solare non è sufficiente a far funzionare in maniera corretta il chiller ad adsorbimento[8]. Al fine di gestire i flussi di energia e la loro priorità, dal campo solare e dalla caldaia a gas verso il refrigeratore ad adsorbimento, è stato installato un PLC (6 in Figura 4.34), su cui è stata implementata una logica di gestione appositamente progettata. La Figura 4.34, oltre all'intera centrale frigorifera, mostra il refrigeratore ad adsorbimento utilizzato in questo progetto: è stato installato un refrigeratore ad adsorbimento commerciale prodotto dalla Sortech gmbh, da 8kW di potenza frigorifera (mod. ACS 08) ed impiegante acqua come fluido frigorifero.

8_I risultati del modello di simulazione dinamica hanno dimostrato che la superficie captante del campo solare può fornire fino al 95% dell'energia termica necessaria per il sistema durante il funzionamento estivo.

Figura 4.33_Vista generale del campo solare a tubi sotto vuoto installato su una porzione di terrazza dell'Istituto CNR-ITAE di Messina.

Figura 4.34_Due diverse viste della centrale frigorifera: 1- caldaia a gas, 2- accumulo, 3- chiller ad adsorbimento, 4- vaso di espansione, 5- pompa solare e dispositivi di sicurezza, 6- sistema di controllo elettronico (PLC).

4.7 • LEGNO E SICUREZZA ELETTRICA

4.7.1 Premessa - Il legno brucia...ma resiste!

In questi anni in cui il mercato edile, spinto dalle esigenze energetiche ed ambientali, ha avviato un processo di rinnovamento interno, pigro, ma potenzialmente senza precedenti, il legno si sta proponendo come "materiale da costruzione innovativo", in grado di coniugare esigenze di comfort, durabilità, risparmio energetico, ecc… D'altronde una ampia fascia di pubblico, così come di operatori del settore edile, forse poco informati, denuncia una certa perplessità verso il legno. Essa scaturisce dalla convinzione che il legno, bruciando con facilità, sia meno sicuro e durevole di altri materiali, più 'tradizionali', quali il calcestruzzo armato, l'acciaio e il laterizio. Al fine di scardinare quanto radicato nell'immaginario collettivo, diversi studi sperimentali, effettuati in ambito nazionale ed internazionale, hanno già dimostrato quanto sostenuto da addetti ai lavori, forti di conoscenze teoriche sui materiali, nonché di una buona dose di esperienza.

Le case di legno in caso d'incendio, dal punto di vista della loro resistenza strutturale, non risultano, in generale, più pericolose. Questo si può affermare analizzando, per esempio, i risultati conseguiti nel 2007 dal progetto di ricerca SOFIE (*Sistema Costruttivo Fiemme*). Coordinato dal CNR-IVALSA e finanziato dalla Provincia Autonoma di Trento, il progetto ebbe come scopo la definizione di prestazioni e potenzialità dell'ormai classico sistema strutturale X-Lam (*Cross Laminated Timber*), nella costruzione di edifici a più piani.

Le prove distruttive effettuate presso il Building Research Institute di Tsukuba in Giappone, vista l'esiguità dei danni riportati dagli elementi strutturali dell'edificio (giudicati facilmente riparabili con piccoli interventi superficiali), consentono di affermare che un edificio a struttura portante di legno, realizzato con sistema X-Lam, non è più esposto di altri edifici al pericolo di incendio. Ciò, in particolar modo, ove si preveda il rivestimento delle pareti con strati di materiali isolanti e incombustibili, al fine di migliorarne quella che in gergo tecnico è nota come 'reazione al fuoco'.

Dunque il legno, da ottimo materiale combustibile, in presenza di una adeguata quantità di ossigeno, brucia. Ma ciò non significa che le strutture in legno siano più vulnerabili di altre dal punto di vista della 'resistenza al fuoco'. Tale proprietà, in effetti, prescinde dal tipo di materiale impiegato, dipendendo invece dalla geometria, dai carichi agenti e dalle condizioni di esposizione delle strutture. Essa è dunque da valutare caso per caso ([1], [2], [3]). Anzi gli edifici in legno, progettati e costruiti con criteri moderni, sono molto apprezzati dal Corpo dei Vigili del Fuoco, in quanto, a differenza delle altre strutture, è possibile prevederne i tempi di cedimento con un buon grado di confidenza, programmandone in tutta sicurezza l'evacuazione [4].

Premesso dunque che, dal punto di vista strutturale, la resistenza al fuoco delle moderne case in legno sia garantita da una loro adeguata progettazione, d'altronde, è intuibile che l'installazione di impianti elettrici all'interno di strutture combustibili potrebbe renderle più vulnerabili per quanto attiene in generale alla sicurezza.
Quanto di seguito riportato, lungi dal potersi considerare esaustivo dell'argomento, intende fornire alcuni riferimenti e spunti, talvolta critici, per affrontare la problematica, senza lasciarsi intimorire dall'attuale ginepraio legislativo e normativo.
Dopo una rapida analisi della problematica, traendo spunto dalle attuali prescrizioni normative, verranno presentati alcuni provvedimenti e soluzioni pratiche che, puntando ad un'ottimale integrazione del sistema 'Edificio/Impianti', consentono di realizzare negli edifici in legno impianti elettrici sicuri e funzionali, o, come richiesto dal legislatore, "a regola d'arte".

4.7.2 Elettricità e rischio incendio

In questi anni in cui il mercato edile, spinto dalle esigenze energetiche ed ambientali, ha avviato un processo di rinnovamento interno, pigro, ma potenzialmente senza precedenti, il legno si sta proponendo come "materiale da costruzione innovativo", in grado di coniugare esigenze di comfort, durabilità, risparmio energetico, ecc…
A livello nazionale l'edilizia in legno può essere considerata ancora un fenomeno di nicchia e ciò è riscontrabile anche dalla mancanza di uno specifico riscontro normativo riguardante l'impiantistica correlata a tale moderna ed innovativa tipologia costruttiva. Non si può infatti affermare che esista tra le norme tecniche elaborate dal CEI, il Comitato Elettrotecnico Italiano, una sezione specifica che tratti esplicitamente l'argomento dell'impianto elettrico nell'edificio di legno.
Analizzando la Norma CEI 64-8, la 'Bibbia' del progettista elettrico, alla sua Parte 7 riguardante 'Ambienti ed Applicazioni Particolari' [5], troviamo un riferimento al 'legno' solo all'interno della sezione 751, che tratta, in generale, gli "Ambienti a maggior rischio in caso d'incendio" o ambienti MARCI, secondo un acronimo molto familiare tra gli addetti ai lavori.
L'articolo 751.03 della stessa, sottolinea che "le caratteristiche di valutazioni dei rischi di incendio ai fini della classificazione degli ambienti…devono essere considerate come dati di progetto" e rimanda la classificazione del luogo ad altra normativa[9]. Di fatto però l'articolo, distinguendoli dai cosiddetti 'luoghi ordinari', classifica come a maggior rischio gli edifici aventi strutture portanti combustibili (vedi Legno). Questi, al comma 03 del medesimo articolo (751.03.03), vengono definiti 'ambienti di Tipo B', per distinguerli da quelli 'con elevata densità di affollamento' o da quelli 'con presenza di materiale infiammabile o combustibile in lavorazione', classificati anch'essi come luoghi MARCI, ma rispettivamente di 'Tipo A' e di 'Tipo C'.
Ora benché la valutazione dei rischi dal punto di vista dell'incendio non rientri d'ufficio tra le attività del progettista elettrico, né essa sia da effettuare a priori[10],

9_D.Lgs 81/08 "Testo Unico sulla Sicurezza" (ex D.Lgs 626/94); D.M. 10/03/98 "Criteri generali di sicurezza antincendio e per la gestione dell'emergenza nei luoghi di lavoro".

10_Tali valutazioni sono da effettuare obbligatoriamente se l'edificio in oggetto è sottoposto a controllo

sarà lo stesso tecnico tenuto a chiarire comunque ogni dubbio e prendere tutti i provvedimenti del caso per garantire 'la regola dell'arte'.
Tralasciando qui di considerare come causa d'incendio le fiamme libere, stufe e camini[11], si ricorda che i componenti elettrici riscaldano nel funzionamento ordinario, ma soprattutto in caso di guasto, sicché realizzare un impianto elettrico a contatto o dentro le strutture in legno, richiederà necessariamente l'applicazione di accorgimenti particolari.
In generale, l'impianto elettrico può essere causa d'incendio per diversi motivi:

1. Scintille (particelle incandescenti) ed archi elettrici. Particelle incandescenti che possono essere prodotte e diffuse a seguito del danneggiamento di un componente elettrico (es: scoppio di una lampadina), archi elettrici che si sviluppano per l'azionamento di interruttori (archi funzionali) o per guasto, tra le fasi o verso massa;
2. Punti caldi. Riscaldamento localizzato e potenzialmente a rischio che può aversi a seguito di connessioni lasche, correnti verso terra per guasti permanenti oppure per errato dimensionamento dei componenti.
3. Scariche atmosferiche. Fulmini che possono abbattersi sull'impianto, per fulminazione diretta della struttura, o per sovratensioni indotte, sollecitando comunque i componenti elettrici con ripidi fronti di corrente e tensione, e mettendo gli stessi a rischio di fusione o di esplosione.

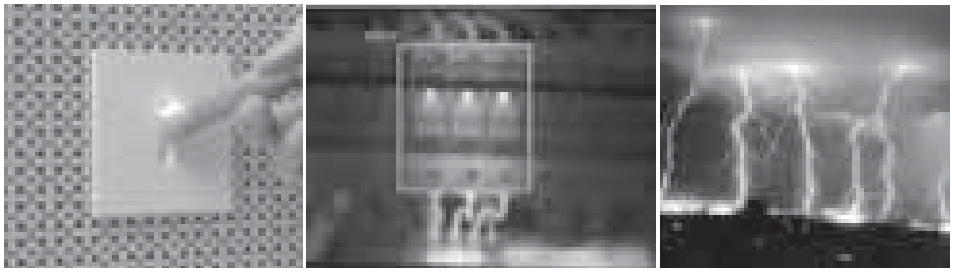


Figura 4.35_Potenziali cause d'incendio elettrico (archi elettrici; punti caldi; scariche atmosferiche).

A tali rischi, del tutto ordinari, si devono aggiungere alcune criticità specifiche di cui possono essere oggetto le moderne abitazioni in legno.
Se il legno strutturale di per sé è un combustibile, d'altronde bisogna considerare che la presenza di intercapedini, cosiddette 'porta-impianti', a parete e/o a pavimento, può creare condizioni di rischio particolari. Nelle intercapedini il principio di incendio può covare a lungo senza rivelarsi, d'altronde la maggiore presenza di aria può facilitare l'incendio e potenzialmente innescare un "effetto camino".
Le medesime intercapedini, poi, sono spesso interessate da coibentazioni realizzate con materiali, di origine vegetale o animale, derivati o similari del legno come le

da parte dei VVFF ai fini del rilascio del "Certificato di prevenzione Incendi", ossia se si svolgono attività elencate nel DM 16-02-1982. Resta incerto il caso dei luoghi MARCI non soggetti ad attività lavorative.

11_L'utilizzo di stufe a legna e camini nelle case in legno presuppone la messa in opera di opportuni accorgimenti per i passaggi tetto e pareti delle canne fumarie [6].

fibre di canapa, di mais, la lana di pecora, ecc… La vicinanza ai componenti elettrici di materiali combustibili fibrosi, benché opportunamente trattati[12], può contribuire ad innalzare il livello di rischio elettrico.

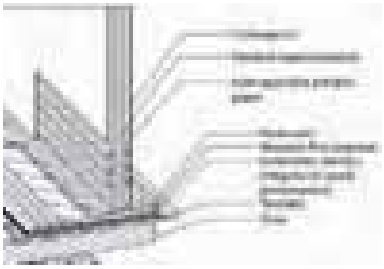


Figura 4.36_Intercapedini porta-impianti di strutture di legno, coibentate con fibre combustibili

4.7.3 Accorgimenti e materiali

Una volta note le cause di incendio e analizzati i rischi specifici, si può passare alla progettazione dell'impianto elettrico. A tal proposito, oltre ai criteri generali di esecuzione indicati dalla normativa, si farà riferimento alle indicazioni contenute nel citato articolo 751 della CEI 64-8/7, il quale prescrive alcuni criteri specifici riguardanti i metodi e i materiali da utilizzare per limitarne il verificarsi, o ridurre i danni che possono presentarsi, a seguito dell'evento sfavorevole [5], [7], [8].
Posto che i componenti elettrici dovrebbero essere limitati a quelli strettamente necessari e non devono costituire pericolo di innesco o di propagazione di incendio per i materiali adiacenti, limitando l'interesse attuale alla posa incassata entro intercapedini combustibili e termicamente isolanti, nella realizzazione di un impianto elettrico in un edificio in legno bisogna considerare i seguenti aspetti:

- *Condutture* - Al fine di evitare che eventuali scintille fuoriescano dal componente e vadano a lambire parti combustibili le condutture (scatole e cassette di derivazione comprese) devono presentare, almeno verso le strutture combustibili, grado di protezione minimo IP4X13 (IP4X), indipendentemente dalla classe di reazione al fuoco delle pareti.
- *Tubazioni isolanti* - Anche se i cavi saranno provvisti di guaina, devono essere segregati rispetto all'ambiente circostante, utilizzando idonea tubazione, anche isolante (rigida o flessibile)14. Le tubazioni isolanti devono aver superato la prova del filo incandescente (Glowing Wire Test o GWT)15 a 750 °C. Tale requisito è soddisfatto in pratica da tutti i tubi corrugati.
- *Scatole e cassette* (portafrutto, portacentralino, di derivazione) – Devono essere conformi alla installazione all'interno di pareti ad intercapedine, in cartongesso o legno, realizzate in materiale plastico speciale (tecnopolimero autoestinguente)

12_La canapa idoneamente trattata raggiunge una classe di resistenza la fuoco pari a 2, ovvero la sua combustione cessa 20 secondi dopo che la fiamma che la alimenta viene allontanata.

13_Per componente con grado di protezione IP4X si intende un componente protetto contro corpi solidi di dimensioni superiori a 1 mm e contro l'accesso con un filo.

14_Conforme alla norma EN 61386-1 (CEI 23-80) "Sistemi di tubi e accessori per installazioni elettriche"

15_Le modalità di prova del GWT sono stabilite dalla norma EN 60695-2-11 (CEI 89-13).

ed aver superato il GWT a 850 °C (marcate con 'H' o recanti informazione che sono adatti al tipo di posa)[16]. Figure 4.22 ÷ 4.24. In alternativa esistono diverse soluzioni per 'schermare' le comuni scatole per pareti piene (Tipo 503). Fig. 4.5.

- *Protezione differenziale* – Per limitare l'eventualità di punti caldi dovuti a correnti di dispersione, è opportuno proteggere tutti i circuiti con interruttori differenziali ad alta sensibilità (Idn 0.3 A, per circuiti terminali; Idn 1A, per circuiti di distribuzione) e conduttore di protezione (PE).
- *Conduttore di protezione* - Per favorire l'intervento dell'interruttore differenziale in caso di guasto a terra (non franco), come cautela aggiuntiva, l'impiantistica statunitense utilizza cavi multipolari con all'interno il conduttore di protezione nudo. Questo va previsto anche su cavi che alimentano circuiti non collegati a terra (es: il comando luci), curando di effettuare il collegamento a terra entro le cassette di derivazione.
- *Cavi* (*tipo*) - Adottando il grado di protezione IP4X per tubazioni e scatole, la norma non pone particolari restrizioni per la tipologia di cavi. Essendo sufficiente il tipo 'non propagante l'incendio'[17], potrebbe utilizzarsi la classica cordina N07V-K (unipolare), anziché i più impegnativi cavi multipolari con PE, ossia FROR o (meglio) FG7(O)M1. I multipolari però sono fortemente consigliati per quanto riportato al punto precedente.
- *Cavi* (*portata*) - La portata dei cavi posati entro intercapedini termicamente isolanti viene a ridursi (almeno del 20%) a causa della maggiore difficoltà a smaltire il calore verso l'esterno. La determinazione della portata va effettuata in base il procedimento generale indicato nella norma CEI 20-21, in quanto la Tabella CEI UNEL 35024/1 non è in questo caso applicabile. Usando conduttori con isolamento in PVC (cordina o FROR), è opportuno prevedere sezioni da 4 mm^2 per l'alimentazione di circuiti prese protetti con interruttori magnetotermici con In 16A
- *Apparecchi di illuminazione* – Poiché nel loro funzionamento normale riscaldano, nella loro scelta bisogna verificare se siano adatti o meno al tipo di installazione prevista, utilizzando la simbologia su essi riportata e stabilita dalla norma EN 60598-1 (CEI 34-21), cui si rimanda[18]. Da preferire apparecchi a sospensione o in alternativa utilizzare, ove possibile, gli appositi schermi. Fig. 4.26, 4.27. Attenzione va prestata anche ad eventuali alimentatori indipendenti.
- *Interruttori e prese a spina* – Benché la norma non consideri pericolosi gli archi funzionali prodotti da tali apparecchiature, la prudenza consiglia anche qui il grado di protezione IP4X.

Trattando di edifici in legno, un'attenzione particolare merita poi la protezione dal "rischio fulmine".
Effettuando il calcolo in base alla norma CEI 81-10, si sottolinea l'opportunità di procedere, qui più che altrove, ad una attenta valutazione dei danni economici che

16_Conformi alla norma EN 60670-1 (CEI 23-48).

17_Non si considera qui il caso di luoghi con affollamento, ecc., ove sono richiesti cavi speciali del tipo LS0H.

18_Si ricorda che la norma di prodotto relativa alla costruzione degli apparecchi di illuminazione (CEI 34-21) vieta l'installazione dei corpi illuminanti su superfici in legno il cui spessore sia inferiore a 2 mm.

potrebbe subire l'edificio a seguito di una scarica atmosferica[19], predisponendo tutte le misure di protezione necessarie.
Evitando di cadere nel 'mito della autoprotezione'[20] , si consiglia di installare opportuni scaricatori di sovratensione a protezione di tutti gli impianti presenti, sia elettrici che di segnale (telefono, dati, ...) e verificare l'opportunità tecnico-economica di realizzare un moderno impianto di protezione da scariche atmosferiche (Lighting Protection System o LPS) ... il vecchio e sempre utile parafulmine.

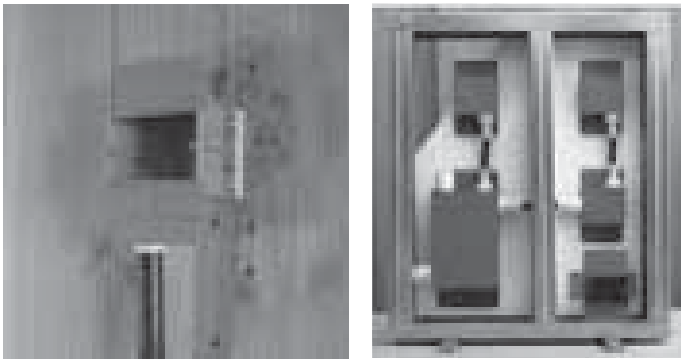


Figura 4.37_Esempio di scatola e sistema completo, adatti per installazioni in intercapedini.

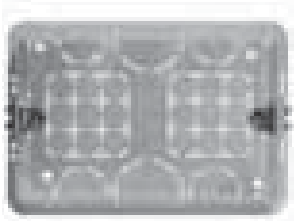


Figura 4.38_Comune scatola portafrutto (tipo 503), non adatta per le 'case in legno' (IP<4X; GWT 650° C).

19_Per la complessità del calcolo e la difficoltà nel reperire i dati necessari (dovrebbe fornirli il committente), spesso il rischio economico viene trascurato, valutando unicamente il rischio di perdita di vite umane.

20_Se in base ai calcoli il livello di rischio è ritenuto accettabile l'edificio si definisce "autoprotetto" e la norma non richiede ulteriori misure di protezione contro i fulmini. Ma trattandosi di un calcolo di probabilità, ciò che è accettabile per un edificio tradizionale in muratura, può non esserlo per uno in legno.

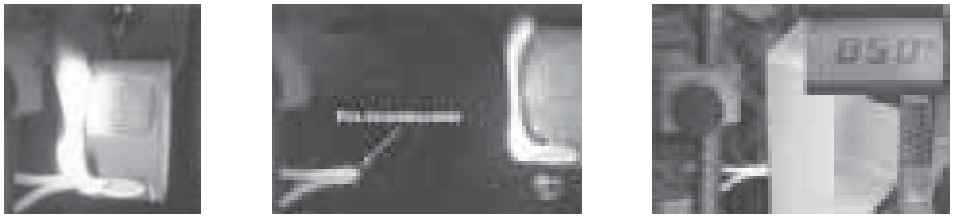


Figura 4.39_La prova del filo incandescente a 850°C, superata dalla scatola a destra (Fonte: TNE).

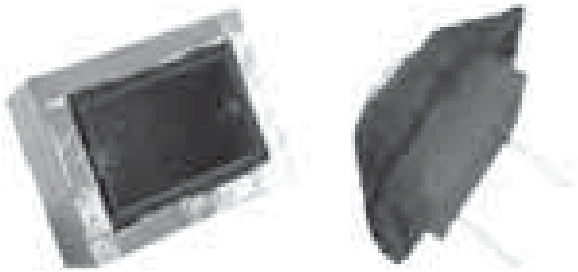


Figura 4.40_Soluzioni alternative: involucri (rigidi o in fibre minerali) contenenti scatole 503 tradizionali.

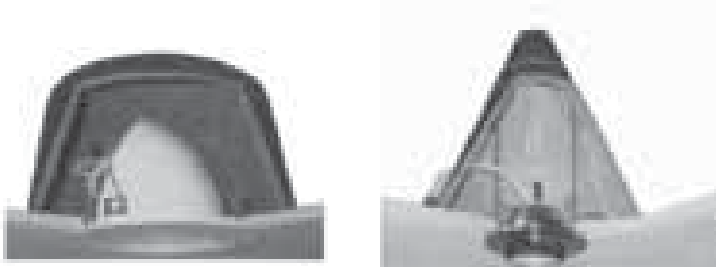


Figura 4.41_Schermi a base di fibre minerali per ricoprire gli apparecchi di illuminazione idonei.

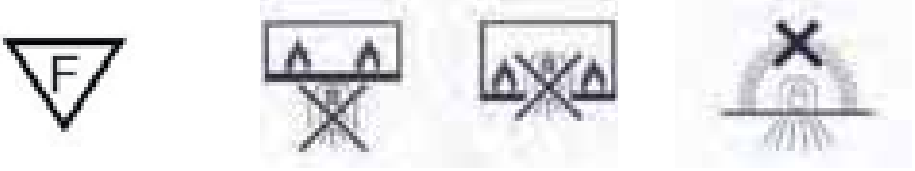


Figura 4.42_Simbologie per apparecchi di illuminazione EN 60598-1 (CEI34-21), rispettivamente: a) adatto per posa diretta su superficie combustibile (simbolo 'F'); b) non adatto per posa diretta su superficie combustibile; c) non adatto per posa incassata in superficie combustibile; d) non idoneo ad essere ricoperto.

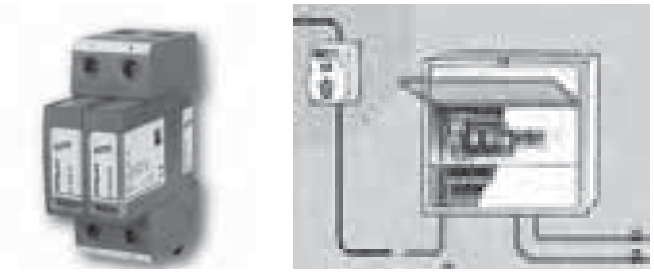


Figura 4.43_Scaricatori di sovratensione e loro alloggiamento nel quadro

Infine è quasi superfluo ricordare che, al fine di mantenere elevato il livello di sicurezza, in generale, è opportuno proteggere gli edifici costruiti con materiali combustibili con un semplice impianto di rivelazione incendi realizzato in conformità alla norma UNI 9795.
In conclusione, si può affermare che, grazie ad un opportuno lavoro di integrazione impiantistico-architettonica, facilitato dalla disponibilità commerciale di materiali e soluzioni tecnologiche, è oggi possibile realizzare edifici in legno, non meno sicuri, dal punto di vista elettrico, di quelli tradizionali.

APPENDICE 1_CERTIFICAZIONE ENERGETICO-AMBIENTALE: UNA PANORAMICA SUI PROTOCOLLI

Fatto salvo quanto previsto dall'attuale panorama legislativo nazionale ed internazionale, l'importanza di attestare le caratteristiche energetiche ed ambientali di un edificio, in legno o meno, è oggi evidenziata dal proliferare di specifici protocolli di certificazione o "Rating Systems".
Basata su liste di requisiti (criteria), a ciascuno dei quali viene attribuito un giudizio di valutazione su scala numerica (score), l'applicazione dei protocolli conduce alla individuazione di un punteggio globale che esprime quanto sia "sostenibile" l'edificio in esame (pagella ambientale).
I protocolli, benché caratterizzati ognuno da alcune peculiarità che li contraddistinguono, puntano ad alcuni obiettivi comuni, sintetizzabili come segue:

1. migliorare la trasparenza del mercato immobiliare, fornendo ad acquirenti e locatari un'informazione oggettiva e chiara su caratteristiche e spese energetiche dell'immobile;
2. informare e rendere coscienti i proprietari del costo energetico relativo alla conduzione del proprio "sistema edilizio", in modo da incoraggiare interventi migliorativi dell'efficienza energetica della propria abitazione;
3. rendere evidenti gli sforzi economici sostenuti da parte dei proprietari che apportano miglioramenti energetici importanti ma poco visibili, come isolamenti termici di muri, tetti, etc.
4. informare gli utenti sui notevoli benefici ambientali conseguibili grazie alla applicazione al settore dell'edilizia di moderni criteri progettuali, contribuendo così alla diffusione di una nuova coscienza energetica ed ambientale.

Il valore aggiunto fornito dalla applicazione dei Ratings Systems al settore delle costruzioni si basa su:

- Sviluppo di un processo controllato e strutturato attraverso un'integrazione di saperi diversi;
- Utilizzo di strumenti di calcolo in grado di fornire adeguato supporto al processo decisionale;
- Presenza di un riconoscimento istituzionale del risultato conseguito;
- Riconoscimento da parte del mercato di una più efficiente pratica che finisce per agire in maniera virtuosa sulle professioni di progettisti e costruttori.

A livello nazionale, nonostante l'attuale diffusione dello standard CasaClima, stanno trovando affermazione anche i protocolli BREEAM, LEED e Itaca, nonché il metodo tedesco elaborato dal Passivhaus Institut, di fatto ispiratore del protocollo altoatesino.

Casa Clima - il protocollo CasaClima privilegia la scelta di interventi che, al fine di contenere i fabbisogni di riscaldamento e climatizzazione, vanno ad agire soprattutto sull'efficienza energetica dell'involucro edilizio, ossia sull'isolamento termico. Per il calcolo è disponibile su piattaforma on-line il programma

ProCasaClima al quale si affianca una dettagliata direttiva tecnica; accompagnano la certificazione energetica degli edifici anche due strumenti di valutazione e certificazione degli impatti ambientali di una costruzione [17].

LEED Italia (**Green Building Council Italia**) - il sistema di certificazione LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) è uno standard internazionale applicato in oltre 100 Paesi. Sviluppato dall'U.S. Green Building Council (USGBC), associazione no-profit che promuove e fornisce un approccio globale alla sostenibilità, fornendo un riconoscimento alle performance virtuose in aree chiave della salute umana ed ambientale, LEED prevede lo sviluppo di edifici "verdi" ad alte prestazioni a livello energetico. Il sistema si basa sull'attribuzione di crediti per ciascuno dei requisiti caratterizzanti la sostenibilità dell'edificio. I criteri valutativi sono i seguenti: Insediamenti sostenibili; Consumo efficiente di acqua; Energia e atmosfera; Materiali e risorse; Qualità degli ambienti indoor; Progettazione e innovazione. Considerati i crediti attribuiti, ci sono quattro livelli di certificazione: base, argento, oro, platino.
Dopo il successo di LEED Italia 'Nuove Costruzioni' e 'Ristrutturazioni' sono in arrivo i protocolli LEED GBC Italia[1] per gli 'Involucri' e 'Home' per il residenziale sotto i quattro piani fuori terra. Non vi è dunque un unico protocollo ma una serie di protocolli accomunati da uno schema concettuale che si declina in modo diverso in funzione della tipologia dell'edificio che si vuole certificare [18].

Passivhaus - è un criterio molto particolare e dettagliato di concepire gli edifici dal punto di vista energetico, codificato dall'omonimo istituto (il Passivhaus Institut di Darmstadt in Germania) come standard di certificazione. Nell'edificio passivo, durante tutto l'anno, sono raggiunte e mantenute condizioni di comfort termo-igrometrico senza ricorrere all'installazione di impianti di riscaldamento o climatizzazione. L'istituto di Darmstadt ha definito la casa passiva come 'struttura senza impianto di riscaldamento' [19].

BREEAM - acronimo di Building Research Establishment Environment Assessment Method, è un sistema di qualità indipendente di matrice britannica, valutato da professionisti e conforme ai sistemi ISO 9001 e 14001, finalizzato alla

1_ GBC Italia (Green Building Concil Italia) è un'associazione nata nel Gennaio 2008, promossa dal Distretto Tecnologico Trentino S.c.a.r.l., ricalcando la struttura del GBC statunitense. Attualmente conta più di 300 associati.

revisione e alla valutazione delle prestazioni degli edifici. In realtà è il primo nato dei sistemi a punteggio per la valutazione della sostenibilità (1993) ed ha rappresentato quindi un punto di riferimento per la elaborazione dei metodi successivi [20]. Il sistema viene impiegato su base volontaria ma, in Inghilterra, ha ottenuto un successo rilevante al punto che più del 25% dei nuovi edifici per uffici sono stati valutati attraverso la sua applicazione. L'inglese BRE Global limited sviluppatrice del sistema, considera, tra i requisiti prestazionali da soddisfare, anche l'impiego di materiali eco-compatibili. A tal proposito, non potendosi prevedere, per ciascuno dei casi analizzati, valutazioni LCA dei singoli materiali impiegati, il sistema BREEAM fa riferimento ad etichette di prodotto:

- gli standard FSC (Forest Stewardship Council) o PEFC (Pan European Forest Certification), per l'impiego del legno;
- la "Green Guide to Housing Specification", appositamente elaborata dal BRE per la valutazione e la scelta dei materiali da costruzione.

Protocollo ITACA (**SB-Method**) – i sistemi di certificazione visti in precedenza nascono con un forte limite strutturale: sono applicabili solo nella specifica realtà geografica, territoriale, climatica ed economico-sociale nella quale sono stati sviluppati.
Il Sustainable Building Method, elaborato dal Green Building Challenge, benchè adattato anch'esso per la realtà italiana, dando origine al Protocollo Itaca (CNR), è invece uno strumento di valutazione derivante dalla matrice scientifica, di respiro internazionale in quanto risultato della ricerca pubblica e privata condotta in 24 diverse nazioni del globo. Il protocollo offre un sistema integrato per la certificazione degli edifici di tipo istituzionale e di mercato [21].

Per la certificazione dei risultati ottenuti dall'applicazione del Protocollo ITACA è nato di recente (30 Marzo 2011) il marchio di qualità per la sostenibilità degli edifici ESIT (Edilizia Sostenibile Italia) attraverso il quale è possibile certificare gli immobili di qualsiasi destinazione d'uso e per ogni fase del ciclo di vita. Secondo i promotori dell'iniziativa, ITC-CNR, iiSBE Italia (international initiative for a Sustainable Built Environment) e Itaca, "si viene così a creare il riferimento nazionale per la certificazione di sostenibilità che finora è mancato, saldando la certificazione pubblica a quella di mercato".

APPENDICE 2_TECNICHE E STRUMENTI PER LA DIAGNOSI, IL COLLAUDO E IL MONITORAGGIO ENERGETICO

L'emanazione, relativamente recente, delle normative per il contenimento dei consumi energetici in edilizia ha posto in risalto la necessità di provvedere alla stima accurata di alcune grandezze fisiche le quali risultano coinvolte, a diverso titolo, nel processo edilizio.

Il ricorso alla misurazione in opera diviene centrale in quanto l'acquisizione dei dati per la diagnosi energetica di un edificio esistente, o per la verifica di una nuova costruzione, comporta spesso notevoli difficoltà legate alla non reperibilità del progetto cartaceo e alla non corrispondenza di questo con il costruito.

Viene di seguito riportata una breve rassegna sugli strumenti di indagine e sulle tecniche utilizzabili, in generale, per diagnosticare, validare e garantire nel tempo le prestazioni energetiche dell'edificio.

Termoflussimetria e termoflussimetro

Allo scopo di stimare il fabbisogno energetico e le conseguenti emissioni di CO_2 per il riscaldamento invernale o il raffrescamento estivo di un edificio, è importante determinare i valori di trasmittanza termica U (W/m^2K) del suo involucro.
La sua valutazione, può essere generalmente condotta secondo uno dei seguenti 4 diversi metodi:

1. La stratigrafia della struttura è conosciuta (si hanno i disegni aggiornati del progetto architettonico o della relazione legge 10/91 e impianti); la trasmittanza viene calcolata in accordo con la norma EN ISO 6946.
2. La stratigrafia non è conosciuta e quindi si procede a eseguire un foro per stabilire tipo di materiale e spessore. Il foro può essere di piccole dimensioni e quindi si utilizza un endoscopio, oppure può essere di maggiori dimensioni, il carotaggio, e le caratteristiche del materiale vengono stabilite direttamente: l'esperienza del professionista gioca un ruolo fondamentale. Una volta stabilita la stratigrafia della parete la trasmittanza viene calcolata in accordo con la norma EN ISO 6946.
3. L'edificio è riconducibile a una determinata e caratterizzata tipologia edilizia di cui si conoscono le stratigrafie; è possibile agire per analogia stimando le trasmittanza dei componenti. Le raccomandazioni del CTI (Comitato Termotecnico Italiano) contengono un esempio di abaco di questo genere.
4. La trasmittanza della struttura viene misurata in opera in accordo con la norma ISO 9869, tramite l'utilizzo di apparecchiature specifiche, applicando la tecnica diagnostica detta 'termoflussimetria'.

La misura viene effettuata mediante apposito strumento detto 'termoflussimetro a piastra', applicando il metodo delle medie progressive, secondo la norma ISO 9869.
I termo-flussimetri sfruttano il fenomeno fisico noto come "effetto Seebeck", ovvero la generazione di una forza elettromotrice in un circuito costituito da metalli diversi

quando i punti di giunzione si trovano a temperature diverse.
Lo strumento deve essere montato sulla parete dove la temperatura è più stabile, ovvero all'interno dell'abitazione. Per l'unità esterna bisogna evitare l'esposizione solare, quindi è raccomandata la parete nord. E' bene effettuare la misura di presenza di buone differenze di temperatura tra interno ed esterno; la durata minima della misura deve essere di almeno 72 ore, ma se la temperatura non è stabile attorno al termo-flussimetro è necessaria una misura più lunga.
Il metodo delle medie progressive (o media mobile) consiste nel calcolare i valori di trasmittanza utilizzando ad ogni istante i valori di flusso e di temperatura calcolati su tutti gli istanti precedenti. In questo modo il valore di trasmittanza tende ad approssimare asintoticamente quello che meglio rappresenta il comportamento della struttura.
Da diverse esperienze effettuate sul campo, si è riscontrato che spesso i valori di trasmittanza misurata sono superiori a quelli della trasmittanza calcolata (anche dell'ordine del 20%), ma anche più attinenti alla realtà. I motivi alla base di questa differenza vanno ricercati fra:

- Messa in opera non conforme al progetto;
- Degradazione delle prestazioni isolanti dei materiali nel corso del tempo;
- Condizioni ambientali diverse da quelle di progetto (es. umidità negli strati isolanti).

A tal proposito la misura con il termoflussimetro trova un valido alleato in un altro metodo di indagine utilizzato nel settore in oggetto: la termografia ad infrarossi.
Se le condizioni termiche alle quali è sottoposta la parete fossero di regime stazionario, la conduttanza L e la trasmittanza U potrebbero essere ricavate per via sperimentale semplicemente attraverso la misura istantanea del flusso specifico e delle temperature interna ed esterna.

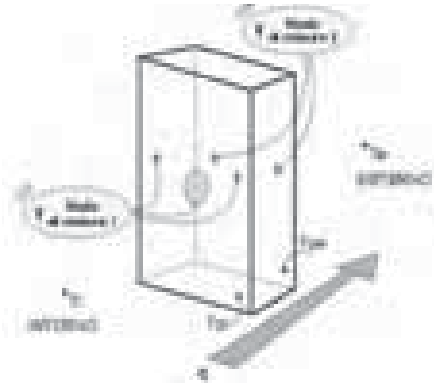


Figura 4.44_Principio del metodo della termoflussimetria.

Dove:

$$q = \frac{\dot{Q}}{A} \left[\frac{W}{m^2}\right]$$

$$\Lambda = \frac{q}{Tpi - Tpe} \left[\frac{W}{m^2K}\right]$$

$$U = \frac{q}{Ti - Te} \left[\frac{W}{m^2K}\right]$$

Figura 4.45_Termoflusso.

Tale condizione, in realtà, non è mai verificata nel caso di pareti in opera, in quanto gli edifici, nelle condizioni operative reali, sono soggetti a condizioni al contorno fortemente variabili nel tempo. Le procedure di misura adottate in campo dovranno di conseguenza prevedere una opportuna elaborazione dei dati sperimentali, tale da gestire correttamente gli effetti transitori (accumulo e rilascio di energia) indotti nella parete dal regime termico variabile. Ciò, nella pratica, si traduce nell'utilizzare, al posto delle grandezze istantanee, i corrispondenti valori medi, valutati su un periodo sufficientemente lungo:

$$U = \frac{\int q\,d\tau}{\int (Ti - Te)\,d\tau} \approx \frac{\sum q_i}{\sum (Ti - Te)}$$

Termografia a infrarossi e termocamera

La termografia è un metodo di determinazione e rappresentazione della temperatura superficiale tramite misurazione della densità di radiazione infrarossa radiante da una superficie. Essa comprende l'interpretazione dei meccanismi che producono irregolarità delle immagini termiche. A seguito della valutazione di altri parametri dell'oggetto indagato (emissività, distanza), dell'ambiente (temperatura, umidità relativa, vento, pressione) e dello scenario circostante (presenza di "temperature riflesse" da altre superifici) è possibile convertire il valore misurato di radiazione infrarossa in valori di temperatura. Essa è regolata dalla norma UNI EN 13187, specifica per la rivelazione qualitativa dell'involucro termico con metodo termografico, e consente la rilevazione della temperatura superficiale dell'involucro edilizio per verificare la buona esecuzione dell'isolamento termico

(inclusa la rilevazione dei ponti termici - Vedi Figura 4.46).
Mediante la termografia sono rilevabili anche difetti nella permeabilità all'aria dell'edificio, in quanto i flussi di aria a diversa temperatura determinano, per convezione, anomalie delle temperature superficiali (Figura 4.47).
Questa prova, secondo la norma, è eseguibile solo in presenza di una differenza di temperatura minima di 10°C tra interno ed esterno.
La termografia è una "valutazione qualitativa dell'involucro termico" perché da essa non è possibile derivare un valore di trasmittanza dell'involucro. Mettendo in evidenza differenze di temperatura inferiori al decimo di grado, essa però fornisce, velocemente e con ottima precisione (2% della lettura, per temperatura ambiente da +10 a +35 °C [26]), una visione facilmente leggibile delle dispersioni termiche dell'edificio.
La termografia è una prova fondamentale per decidere dove effettuare la verifica della trasmittanza. Infatti, senza aver preliminarmente effettuato una termografia, non è possibile scegliere "a ragion veduta" dove effettuare le prove termoflussimetriche per la misurazione in opera della trasmittanza.

Figura 4.46_Ponti termici ed umidità in edificio residenziale [24].

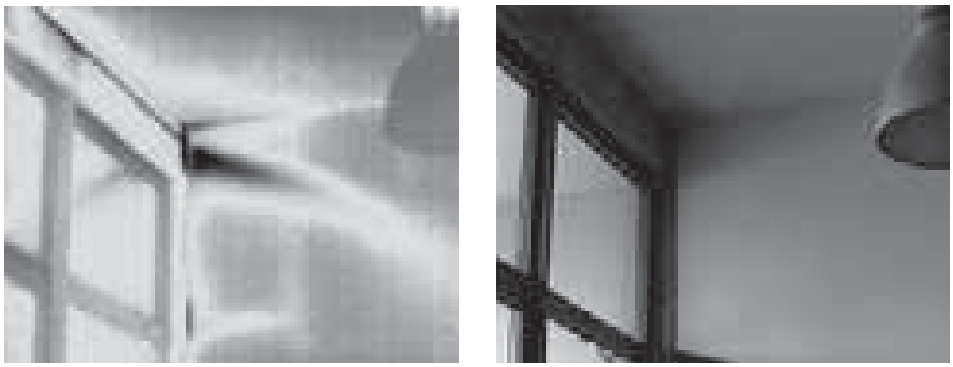


Figura 4.47_Infiltrazione d'aria da infisso in legno, immagine termografica e foto nel visibile [24].

Figura 4.48_Temocamera a raggi infrarossi [25].

Blower door test

Il Blower-Door-Test permette di misurare la permeabilità all'aria, ossia "l'ermeticità" di un edificio. Tale valutazione consente di stimare la capacità dell'edificio di non disperdere energia termica a causa della fuoriuscita dal suo involucro dell'aria calda presente al suo interno, ed analogo ingresso di aria fredda. In estate, se è presente un impianto di condizionamento, vale lo stesso principio, ma applicato in maniera invertita, per il raffrescamento, piuttosto che per il riscaldamento,
La stima delle "le perdite d'aria" dell'involucro edilizio e la valutazione del flusso (o tasso) di ricambio dell'aria è importante in quanto le perdite energetiche causate dalle infiltrazioni d'aria possono raggiungere anche i 1000 kWh/anno.
Attraverso un apposito ventilatore, incassato in un telaio che viene applicato alla porta d'ingresso (da qui il nome inglese del test), l'aria viene immessa o aspirata dall'edificio sotto test. La velocità di rotazione del ventilatore viene regolata in modo che tra l'interno e l'esterno dell'edificio vi sia una prestabilita differenza di pressione.
Opportuni strumenti misurano la differenza di pressione, fornendo il segnale necessario per regolare l'intensità del flusso d'aria che compenserà le "perdite" di pressione dovute alle infiltrazioni. Il flusso d'aria misurato viene diviso per il volume dell'edificio. Questo valore può essere confrontato rispetto ad altri edifici e alle indicazioni di normativa per effettuare una caratterizzazione dell'ermeticità dell'edificio oggetto di studio.
Poiché a infiltrazioni d'aria corrispondono carichi termici che l'eventuale impianto di riscaldamento/condizionamneto deve compensare, il blower door test è fondamentale per valutare il comportamento termico-energetico degli edifici, specialmente se si vogliono raggiungere elevate prestazioni.
Valori tipici di V50 (differenza di pressione 50 Pa) sono:

- casa passiva <= 0,6 /h
- edificio a basso consumo energetico <= 2,0 /h
- edificio con impianto di ventilazione forzata <= 1,5 /h
- edificio tradizionale <= 3,0 /h

Un valore di V50 di 4 all'ora indica che con una differenza di pressione di 50 Pa il volume d'aria dell'edificio viene cambiato per 4 volte in un' ora.
Il Blower Door Test si suddivide in pratica in tre fasi:

1. nella prima fase viene creata e mantenuta una depressione constante di 50 Pa o leggermente superiore. Durante questa fase viene ispezionata l'intera superficie dell'edificio (il suo involucro) alla ricerca delle "perdite", per individuare i punti non ermetici, ossia i punti responsabili delle perdite d'aria e quindi del calore dell'edificio. Le perdite maggiori si possono sentire con la mano, mentre per quelle di intensità ridotta è necessario un generatore di fumo oppure un anemometro, ma può essere utile anche il ricorso alla termocamera;
2. nella seconda fase viene creata un depressione crescente; si parte da valori pari a circa 10, 30 Pa e si prosegue a passi di 5, 10 Pa sino a raggiungere un valore finale di 60, 100 Pa. Per ogni passo si registra e protocolla il flusso di volume d'aria;
3. nella terza fase viene creata una sovrapressione (= depressione invertendo i lati) e le medesime misurazioni fatte nella fase 2 vengono ripetute. Questo indica quanto valgono le rimanenti perdite (con una pressione di riferimento di 50 Pa).

L'esatta procedura di misurazione e' regolata dalla norma UNI EN 13829, [23].

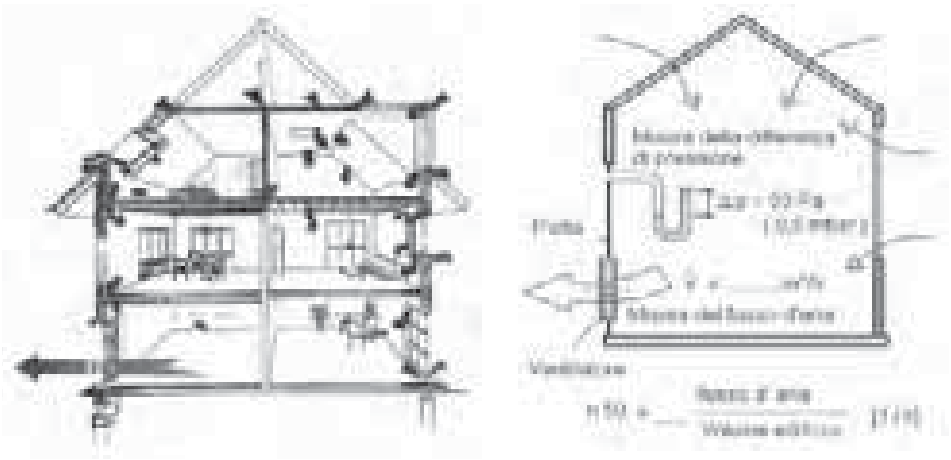


Figura 4.49_Principio del Blower Door Test.

Figura 4.50_Esecuzione del Blower Door Test.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

[1] UNI EN 12831:2006 – "Impianti di riscaldamento negli edifici - Metodo di calcolo del carico termico di progetto".
[2] Carlo Pizzetti - "Condizionamento dell'aria e refrigerazione. Teoria e calcolo degli impianti", 1986, Editore CEA
[3] TRNSYS, edit. Thermal Energy System Specialists, LLC 22 North Carroll Street, Suite 370 Madison, WI 53703 USA, http://www.trnsys.com/.
[4] Henning H. M., "Solar assisted air conditioning of buildings – an overview", Applied thermal engineering, 27, pp. 1734-1749, 2007
[5] Attività PAR 2007 , Condizionamento Estivo, Accordo di Programma MSE/CNR per l'Attività di Ricerca di Sistema, http://www.ricercadisistema.cnr.it
[6] Henning H. M., "Solar – assisted air – conditioning in buildings. A handbook for planners (second revised edition)", Springer Wien, NewYork, 136 p, 2007.
[7] Paul Bourdoukanhttp, "Description of Simulation Tools Used in Solar Cooling - A Technical Report of Subtask C", November 2009 -http://www.iea-shc.org/publications/downloads/Report_C2A_final.pdf
[8] S. Vasta, A. Frazzica, A. Freni, G. Restuccia, "Simulation of a small size adsorption air conditioning system driven by solar energy", Proceedings of the 3rd International Conference Solar Air-Conditioning, 30 Sep - 2 Oct, Palermo, Italy, 2009, ISBN 978-3-941758-06-9, pp. 83-88.
[9] DM 16 Maggio 1987 n. 246 "Norme di sicurezza antincendio per gli edifici di civile abitazione".
[10] DM 16 Febbraio 2007 "Classificazione di resistenza al fuoco di prodotti ed elementi costruttivi di opere da costruzione
[11] DM 9 Marzo 2007 "Prestazioni di resistenza al fuoco delle costruzioni nelle attività soggette al controllo del Corpo nazionale dei vigili del fuoco".
[12]A.A.V.V. – "Linee Guida per l'Edilizia in Legno in Toscana" –Regione Toscana – 2009.
[13]Norma CEI 64-8/7 "Impianti elettrici utilizzatori a tensione nominale non superiore a 1000 V in corrente alternata e a 1500 V in corrente continua" – Parte 7: Ambienti ed applicazioni particolari - Sezione 751 "Ambienti a maggior rischio in caso d'incendio"
[14]Gianni Cecchinato – "Finalmente canne fumarie sicure per le case di legno" – Tetto e Pareti in Legno, N. 32 – Settembre 2008
[15]Vito Carrescia – "Impianti elettrici nei luoghi a maggior rischio in caso d'incendio" - Fondamenti di Sicurezza Elettrica - Edizioni TNE, 2009
[16]"Impianti Elettrici in Ambienti Legnosi" – TuttoNormel – TNE - Febbraio 2010.
[17] *www.agenziacasaclima.it*
[18] *www.gbcitalia.org*
[19] *www.passiv.de*
[20] *www.breeam.org*
[21] *www.itaca.org*
[22] Manuale di THERMOZIG LIGHT di Carlesi Strumenti - www.carlesistrumenti.eu
[23] UNI EN 13829: " Prestazione termica degli edifici - Determinazione della

permeabilità all'aria degli edifici - Metodo di pressurizzazione mediante ventilatore".
[24] *www.saige.it*
[25] *www.flir.com*
[26] Flir i7 - Manuale dell'Utente - Novembre 2010.